

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.07.029

交联聚乙烯电缆电树老化的研究进展

秦晨元, 魏福庆, 杨世元, 邸麟婷, 许惠芳

(中国石油石油化工研究院兰州化工研究中心, 兰州 730060)

摘要: 综述了交联聚乙烯(XLPE)电缆的电树老化现象及其对电缆绝缘性能的影响。介绍了电树老化的特征,包括极性效应、不可逆性以及可与水树老化相互转换等,简述了电树老化主要的几种理论模型,并对比分析了不同理论模型的优缺点,回顾了电树老化的影响因素,包括机械应力、温度和电压等,阐述了电树老化的诊断技术和修复技术,分析了XLPE电缆电树老化所面临的挑战,指出对电树老化的深入研究是解决电缆老化问题的关键,并提出了未来工作的研究方向。

关键词: 交联聚乙烯; 电缆; 电树; 老化; 绝缘性能

中图分类号: TM247 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)07-0175-07

Research Progress on Electrical Tree Aging of Crosslinked Polyethylene Cables

Qin Chenyuan, Wei Fuqing, Yang Shiyuan, Di Linting, Xu Huifang

(Lanzhou Petrochemical Research Center, Petrochemical Research Institute, PetroChina, Lanzhou 730060, China)

Abstract: Electrical tree aging phenomenon of crosslinked polyethylene (XLPE) cable and its impact on the insulation performance of XLPE cable were reviewed. The characteristics of electrical treeing, including polarity effect, irreversibility, and conversion with water treeing, were introduced. An overview of the main theoretical models of electrical treeing was provided and their advantages and disadvantages were compared. The influencing factors of electrical treeing, such as mechanical stress, temperature, and voltage, were reviewed. The diagnostic and repair techniques for electrical tree aging were explained. The challenges faced by electrical tree aging in XLPE cables were analyzed. It was emphasized that in-depth research on electrical treeing was the key to resolving cable aging issues. Finally, future research directions in this field were proposed.

Keywords: crosslinked polyethylene; cable; electrical tree; aging; insulation performance

在全球快速城市化的背景下,电力电缆因其传输容量大、可安装在地下等优势而广泛地应用于城市的电网中^[1]。近年来,交联聚乙烯(XLPE)材料因其具有出色的电气性能以及XLPE电缆拥有轻质结构、易缠绕和高传输极限等优异的特质,我国电缆制造商已经开始使用XLPE电缆来取代传统的油纸绝缘电缆^[2-4]。随着高压技术以及绝缘技术的日益成熟,XLPE电缆现已广泛地应用于长距离的直流输电系统^[5]。

由于电缆长期服役于高电场、高温和受机械应力等多种工作环境中,绝缘材料内的电树老化成为了困扰人们的一大难题,引起了国内外科研人员的高度关注^[6-8]。虽然现在的

制造工艺已经取得了长足进步,但是电缆在制备、运输、敷设和运行过程中,绝缘层内不可避免地会产生一些微小的杂质、气隙或突起等缺陷。这些缺陷在电场应力、机械应力或热应力的影响下,容易使电场发生畸变,从而产生电树^[9]。电树老化是一种降低电缆绝缘性能、缩短电缆使用寿命的电致开裂现象,此现象是导致电缆在应用中事故频发的主要原因之一。

1 电树老化的特征

电树老化是发生在绝缘材料内部的预击穿现象,是引起高压电缆及电缆附件故障的主要问题之一。在高电场、高温和机械应力的作用下,XLPE绝缘材料在长期服役过程中会

通信作者: 秦晨元, 硕士, 工程师, 主要从事聚烯烃新产品研发

收稿日期: 2023-06-21

引用格式: 秦晨元, 魏福庆, 杨世元, 等. 交联聚乙烯电缆电树老化的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(7): 175-181.

Qin Chenyuan, Wei Fuqing, Yang Shiyuan, et al. Research progress on electrical tree aging of crosslinked polyethylene cables[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(7): 175-181.

发生电树老化现象,最终导致介质击穿。目前,许多研究者正在对XLPE电缆的电树老化现象进行不断深入的测试研究,其中不乏大量的测试数据和理论分析,对学术研究具有十分重要的参考价值。

聚合物内发生的电树老化现象由美国研究学者Kitchin等^[10]首次发现,他们对聚乙烯样品在直流、交流以及脉冲电压下形成的电树进行了观察,发现大多数试样绝缘击穿前都出现了电树老化的现象。电树是一种典型的由局部增强电场引起的绝缘老化现象,当电缆绝缘层存在杂质、气体、空洞等缺陷时,绝缘层会在电场集中处局部击穿,从而产生中空、分叉的树状结构放电通道。电树按照形状可以大致分为枝状、丛林状和混合状电树,按照导电能力可以分为导电型和非导电型电树^[11-12]。根据文献报道,XLPE绝缘材料的电树老化现象通常具有以下特征。

1.1 极性效应

电树在直流脉冲复合电压下可以观察到明显的极性效应,当直流电压和脉冲电压极性相同时,随着预加直流电压的增大,电树的起始脉冲电压下降;在极性相反的情况下,电树的起始脉冲电压最初没有明显变化,然后随着预加直流电压的增加而增加^[13]。

1.2 自愈性

一些电树通道在施加稳定的直流电压或电压关闭时逐渐消失,从而导致电树的长度减小,这种现象主要发生在负直流电场引发的电树中。电树的自我修复机制尚未进行深入探索,在当前的研究中,提出了一种可能的解释^[14]:电树在生长过程中破坏了XLPE分子结构,从而形成空心、充满气体的通道,一旦电树停止生长,形成的气体就会逸出,电树周围储存的能量就会被释放出来。随着电树通道直径逐渐变小,通道内壁的XLPE分子链发生重叠,从而促使电树的一部分通道逐渐自愈。

1.3 不可逆性

电树老化会不可逆转地降低聚合物电力电缆的绝缘性能,从而导致完全失效。电树的自愈需要在特定的条件下才会发生,即使发生自我修复,电树对绝缘材料造成的损伤也不能完全恢复^[14]。

1.4 与水树互相转化

电树和水树是XLPE中存在的两种不同类型的树枝老化现象,它们是影响高压电缆和电缆附件中绝缘材料寿命的关键因素^[15]。水树一般是在电场、水分和离子杂质的综合作用下引发的,水树的生长速度通常要比电树的生长速度更加缓慢。当发生水树老化的电缆在实际运行过程中遭受雷击或切换电压时,由于受到过电压的影响,水树尖端或内部缺陷处等局部部位的电场强度将会大幅增加,水树就有可能转变为电树;由于电网中过电压幅值不是很高以及作用时间有

限,在过电压消失后,部分电树的生长可能会因电场强度的减小而停滞,当运行环境中的水分逐渐聚集在电场强度较高的区域,并在较低额定电压下充满电树通道时,电树周围就可能引发水树^[16]。如果电缆在运行的过程中再次受到过电压的影响,水树还可能再次转变为电树。因此,电树和水树在特定的条件下可以发生多次相互转化。

2 电树老化的理论模型

电树是在电缆绝缘层内产生的一种电裂纹,它的生长过程一般可以描述为三个阶段:引发、生长和击穿。近几十年来,相关的研究学者提出了不同的电树生长理论和模型来解释绝缘材料中的电树老化现象,但目前尚未形成统一的结论。

2.1 麦克斯韦电-机械应力论

聚乙烯是一种常用的绝缘材料,经过辐照交联后的聚乙烯在高温下的击穿场强显著增加,该理论将这一现象归因于击穿场强产生了与绝缘材料形变应力相等的麦克斯韦应力。Crine^[17]研究了聚合物在不同电-机械应力下的电学性质,指出麦克斯韦应力作用下的分子变形是发生电树老化的第一步。由于针尖电极处具有非常高的电应力,绝缘材料会产生显著的局部应变,再加上带电粒子的碰撞,材料内部同时发生了物理变化和化学变化。当电场强度超过绝缘材料的承受范围时,会触发特定的放电通道,即宏观表现为电树的形成。Zhu等^[18]在麦克斯韦电-机械应力论的基础上提出了一种新的相场模型,对聚合物在交变电场下的电热击穿进行了建模和模拟,以更好地理解绝缘材料的击穿机制。研究发现,聚合物的击穿特性主要受到介电常数和介质损耗因子的影响,聚合物的高温电热击穿机制与低温电击穿不同。高温下聚合物的介质损耗因子增大,导致热能增强,击穿场强降低。相反,高玻璃化转变温度聚合物的介质损耗因子变化缓慢,可以在高温下保持较高的击穿场强。

该理论强调由交流电压引起的麦克斯韦电-机械应力破坏了电极周围的绝缘材料,由于麦克斯韦电-机械应力无法在直流电压下使分子链发生位移,因此该理论不足以解释绝缘材料在直流电压下引发的电树现象。此外,它也不能反映出电极功函数和空间电荷对电树的影响。

2.2 空间电荷注入及抽出理论

空间电荷注入及抽出理论指出,在交流电压下,处于负半周期的电子会从电极注入到附近的绝缘材料中,在正半周期期间,电子又从绝缘材料中抽出返回到电极,并在接下来的周期中重新注入到电极附近的绝缘材料中。在每个周期过程中,一部分电子将获得足够的能量,使绝缘材料分解成分子质量相对较低的产物和气体,最终形成一个大到足以容纳气体放电的中空通道,从而形成了电树。Zhu等^[19]进一步研究了极高电场下XLPE的电导特性,确定了电荷注入方

程,并分析了空间电荷的特征。结果表明,空间电荷注入深度随着电场升高而受到限制,这可能是由于电荷的负差动迁移所致,在极高电场的驱动下,电荷与绝缘体晶格发生碰撞并散射,从而电荷的平均自由时间减少,并且电荷迁移率随着电场的增加而降低。然而,该理论尚不足以解释聚合物在电子束辐照下引发的电树现象。

2.3 陷阱电荷和电致发光降解理论

空间电荷注入及抽出理论强调电树是由热电子诱导产生的,而陷阱电荷理论则认为电树是由电子和空穴复合过程中释放的能量产生的。

大多数绝缘材料在交流电压、直流电压和脉冲电压下都能检测到电致发光的现象,Laurent等^[20]认为电子和空穴复合过程中紫外辐射造成的损伤是引发电树的主要原因。在交流电压下,负半周期注入的电子被绝缘材料内的陷阱所俘获,从而形成空间电荷区,在正半周期期间,浅陷阱内的电子在反向电场的作用下被释放,而部分电子仍然束缚在深陷阱内。同时,电场强到可以注入空穴,而空穴又被俘获,在注入的空穴和俘获在深陷阱内的电子发生的复合过程中,能量以光子的辐射形式释放出来,从而产生了辉光放电的现象,在接下来的负半周期期间,辉光则是注入的电子和俘获在深陷阱内的空穴复合的结果。电致发光现象贯穿了电树生长的整个过程,该理论揭示了光子在绝缘材料电树老化过程中的作用。

2.4 介质击穿模型(DBM模型)

聚合物中最常用的电树模型是介质击穿模型(DBM模型),该模型认为树状结构是离散生长的,电树在某一方向上的生长概率取决于局部电场强度的大小,从而可以通过调节电场强度的大小来控制树状结构的分形维数。DBM模型可以用来评估空间电荷对电树生长的影响,以及电树在非均匀介质中的生长情况,但它的主要缺点是电场强度与电树生长现象没有物理关系,并且没有将时间作为物理变量纳入模型。Vidya等^[21]针对XLPE绝缘材料在雷电过电压下的电树生长现象进行建模和研究。研究表明,电树的生长通常是一个随机现象,因此对多次模拟结果得到的长度和宽度进行了直方图分析,研究中采用了指数、对数、幂律和多项式分布等不同的模型来拟合电树生长趋势,发现六次多项式分布较适合描述电树的传播。与常用的DBM模型相比,这种基于概率方法的模型考虑了时间作为物理变量的影响,更加真实地反映了电场强度与电树生长的物理关系。

2.5 WZ模型

DBM模型并不涉及击穿场强,所以并不适用于电击穿现象的研究。为了引入击穿判据,WZ模型通过引入两个新参数对DBM电树生长模型进行了改进。首先,引入了电树生长的临界场强(E_c),与电树生长尖端的局部场强(E_{loc})相

比,当 $E_{loc} \geq E_c$ 时,认为电树的生长概率与局部场强成正比,当 $E_{loc} < E_c$ 时,认为电树的生长概率为零;其次,引入了电树生长的结构内部场强(E_s),此时结构中的电势不再等于连接电极的电势(V_0),而是等于 $V_0 + E_s s$,其中 s 为沿结构连接点到电极的路径长度。Yuan等^[22]提出了一种改进的WZ模型,来模拟聚丙烯的电树老化过程,并且验证了电树老化结果与模拟结果的一致性。研究表明,通过用具有强电子亲和力的有机分子半导体掺杂来限制电荷传输,可以显著增强聚合物复合材料在高温和电场下的绝缘性能,同时所提出的模型也为设计具有优异电学性能的绝缘材料提供了理论指导。WZ模型将电树的预击穿模式描述为参数 E_c 和 E_s 的函数,当电极的形状和电压固定时,这些参数决定了电树生长最终是否会发生电击穿,该模型可以有效地模拟电树的演化和分形维数特性。

2.6 放电雪崩模型(DAM模型)

放电雪崩模型(DAM模型)是一个关于材料中击穿结构的定量物理模型。不同于随机模型,该模型不是通过随机选择化学键来推进电树结构的,而是定量地计算单位时间内每个化学键造成的损伤,并且不断累积,直到达到电树通道形成的临界水平。该模型指出,只有当可以促使电树生长的尖端电场围绕其拉普拉斯值上下波动时,才会出现分形树状结构,并且电树的分支量仅取决于局部场强的波动范围。Zhao等^[23]提出了一种改进的DAM模型,并基于该模型提出了电击穿强度的公式,并通过计算DAM模型的形成时间滞后来验证它。研究表明,纳秒时间尺度下的聚合物绝缘材料具有独特的击穿特性,累积击穿从阴极附近开始,分支形态向阳极发展,最终形成树状通道。

2.7 热力学模型

Ding等^[24]建立了在电应力和机械应力共同作用下聚合物中电树生长过程的热力学模型。该模型认为电树生长的尖端周围存在损伤过程区,在此区域内的聚合物会发生形态上的改变,并且将这一现象归因于电树尖端附近的损伤过程区中形成了微孔洞。由于电荷载流子的注入,发生了化学键的断裂和自由基的形成,而每个化学键的断裂都将导致局部应力的增加,进而引起相邻的化学键发生断裂,当某一局部区域内化学键的断裂累积到一定程度时,便会促使微孔洞的形成和生长。该模型可以有效地预测电树在电应力和机械应力共同作用下的失效时间,并且能较好地与电树生长的实验数据相吻合。

3 电树老化的影响因素

XLPE电缆中电树的生长特性会受到机械应力、制备工艺、环境温度和外加电压等诸多因素的影响。

3.1 机械应力

聚合物中的机械应力可以以压缩、拉伸、弯曲、振动和冲

击等形式出现,机械应力可能会导致绝缘材料的本体或与其他材料的界面处产生裂纹,进而引发电树的形成。然而,机械应力对电树生长的影响方式主要取决于机械应力是拉应力还是压应力^[25]。在拉应力作用下,随着拉伸速率的增加,电树的长度、分形维数和累积损伤明显增大,表明较高的拉伸速率加快了电树老化的过程;而在压应力的作用下,提高了裂纹在电树通道尖端发展的内聚强度,抑制了微孔的形成,从而阻碍了电树的引发。

3.2 脱气时间

脱气处理工艺是XLPE电缆制造过程中用来提高材料绝缘性能的处理工艺之一,而电树的形成与脱气过程中交联副产物的种类紧密相关。脱气过程对电树生长的影响方式主要取决于脱气时间的长短^[26]。当脱气时间较长时,XLPE中的交联副产物以枯基醇和苯乙酮为主,此时材料内微孔数量减少,结构更加致密,使得引发电树的起始电压显著升高,从而抑制了电树的形成;当脱气时间较短时,XLPE中的微孔和 α -甲基苯乙烯等杂质占据了影响电树的主导作用,从而促进了电树的引发和生长。

3.3 温度

随着XLPE电缆高压技术的日益提升,电缆运行的温度也不断提高。随着温度的升高,XLPE材料内电树的形态由短小的枝状发展为丛林状,并且电树的长度和宽度随着温度的升高而增加^[27]。此外,XLPE电缆与周围环境的温差会产生温度梯度,当温度梯度较小时,只有丛林状的电树出现,随着温度梯度的增大,电树呈丛林状和枝状结构,并且电树的长度随着温度梯度的增加而增加。在正温度梯度下,随着温度梯度的增大,分形维数和累积损伤先减小后增大;而在负温度梯度下,分形维数和累积损伤均随温度梯度的增大而增大^[28]。

3.4 交流电压

在交流高压电场的作用下,电树老化是XLPE电缆绝缘击穿的主要形式,它可以直接反映出XLPE绝缘材料的服役性能以及老化特性。近年来,相关研究工作表明,在不同交流电压下,电树的初始生长速率都很高,随着时间的延长,电树长度、宽度和扩展面积增大,树枝变深变宽;随着电压的增加,电树长度、宽度、扩展面积和生长速率增大^[29]。此外,XLPE电缆在生产和服务过程中难免会产生一些微小的缺陷,针对这一现象,有些学者在研究工作中指出,在电树的初始阶段,XLPE内部的缺陷由于受到电气、机械和不同的环境应力而聚集;在生长过程中,从缺陷集中处出现了分支结构,并通过介质传播;在发生击穿前,电树缩小了电极之间的间隙,放电逐渐拓宽了穿过间隙的树枝,最终导致了电击穿^[30]。

3.5 直流电压

高压直流电缆中电树老化生长特性的研究滞后于高压交流电缆,相比于交流电压,XLPE绝缘材料在直流电压作用下的电树老化有显著差异^[31]。研究表明,在直流电压的作用下,电树以稀疏细长的枝状结构为主,树形通道为非导电型。电树的生长十分缓慢,生长速度不超过 $1\ \mu\text{m}/\text{min}$,电树的长度取决于电压的幅值和周期次数,XLPE样品可以在70 kV的直流电压下10 h而不会引发电树,但在这种电压下只需要几分钟就可以击穿一个已经引发电树的^[32]。然而,即使在较低的直流电压下,针状电极的意外接地也会导致树木的引发或快速生长。这一现象说明了在相同条件下,引发电树要比电树的生长更加困难,应力的骤变可以同时促进电树的引发和生长。此外,直流电树存在明显的极性效应,相比于负直流电树,正直流电树的生长速度更快,通道击穿主要发生在正直流电树中^[33]。在空间电荷累积的协同作用下,当极性发生变化时,XLPE材料内部更容易引发电树。考虑到温度对电树生长的影响,有学者研究发现,电树在50~70 °C的范围内均为枝状,随着温度的升高,电树的生长速率加快,当电树延伸至平板电极附近时,它会沿着垂直于电场的方向横向发展,从而形成更多的侧支^[34]。

3.6 脉冲电压

高压直流XLPE电缆在运行过程中可能会受到脉冲过电压,这可能会导致电缆绝缘材料内部出现电树老化现象。研究结果指出,脉冲电压可以促进电树的引发,相比于负脉冲电压,电树在正脉冲电压下具有更低的起始电压。随着脉冲频率的增加,电树的形态始终保持不变,而较高的脉冲频率促进了电树生长速率和分形维数的增加;随着脉冲频率的降低,电树的引发概率也降低^[35]。此外,与交流电压相比,由于空间电荷和机械应力的相互作用,电树的引发过程在脉冲电压下更为复杂。

3.7 复合电压

在高压电缆运行过程中,XLPE绝缘材料可能会在直流-交流、直流-脉冲和直流-谐波等复合电压的影响下触发电树。在直流-交流复合电压下,电树的生长速度随正直流偏置电压的增加而增加,且远快于负直流偏置电压^[36]。同时,交流分量将极大地促进电树的生长速度,当交流分量降低时,电树的生长过程较为困难,更容易形成放电量较小的丛林状电树。在直流-脉冲复合电压下,电树的起始长度随直流预应力时间的增加而增加,并在一定时间后趋于稳定^[13]。此外,当直流电压和脉冲电压的极性相反时,在一定幅度范围内的直流电压对电树的起始长度有抑制作用。在直流-谐波复合电压下,相比于负直流偏置电压,正直流偏置电压更容易形成电树,并且随着谐波次数的增加,电树的长度和累积损伤也随之增加,在XLPE电缆的日常运行中应该更加重

视三次谐波的产生^[37]。

4 电树老化的诊断技术和修复技术

XLPE 电缆的电树老化会对电力系统的稳定性、电力设备的寿命和可靠性等方面产生负面影响。为了预防和修复这些负面影响,大量的科学研究人员已经开展了许多研究工作。

4.1 电树老化的诊断技术

Sarathi 等^[38]采用了声发射技术对地下 XLPE 电缆中的电树放电现象进行了诊断研究,通过实验方法成功地产生了电树放电现象,并观察到了电绝缘结构的缺陷处形成了树状结构和灌木状树结构,采用声发射技术,成功地监测到了内部放电形成电树放电的过程,并且得出了部分功率测量是研究电树放电和聚合物绝缘材料潜在失效的有效指标的结论。然而,该研究需要使用专业设备进行声发射技术的测量,成本较高,不利于大规模推广应用。此外,该研究采用了实验室条件下的模拟实验,与现实环境存在一定的差异,因此在实际应用中需要结合实际情况进行评估。

Hammarström 等^[39]提出了一种利用扰动直流波形检测 XLPE 绝缘体中电树形成的方法。该方法采用施加带有高频成分的直流电压来检测和表征在绝缘体退化不同阶段观察到的局部放电迹象,该方法灵活性强,能够独立地变化直流电压水平、扰动的频率和上升时间,可创建相位锁定的相位分辨局部放电图案,便于各种特征的分析。该工作指出,使用扰动直流波形检测到的局部放电特征变化的测量结果,可以用于材料内电树的诊断和预测。然而,该方法可能需要更长时间的实验以获得充分的数据,同时需要对数据进行更复杂的处理和分析。

刘骥等^[40]提出了一种基于低频高压频域介电谱(FDS)的 XLPE 电缆电树老化状态诊断方法,通过搭建低频高压 FDS 测试系统,结合非线性特征参数的概念,可以以非破坏性手段对电树枝长度进行预测,实现对电缆绝缘状态的有效评估。这种方法可以有效解决传统 FDS 测试方法中抗干扰能力差、微电流采集困难等问题,提高了测试的信噪比和采样精度。然而,该方法还需要更加精密的仪器和技术来观测电树枝的三维形态,以进一步研究电树枝宽度和体积变化对电缆绝缘性能的影响。此外,该方法可能需要更多的实验验证和数据支持,以确定其在不同情况下的准确性和可靠性。

4.2 电树老化的修复技术

Li 等^[41]通过注入含水解性硅氧烷基团的新型电压稳定剂,对老化的 XLPE 电缆进行修复。研究表明,电压稳定剂的硅氧烷基团可以显著提高电树起始电压,并显著降低直流电导率和介电损耗因子,修复效果较好。此外,电压稳定剂分子分布在修复电缆的电树通道中,有效抑制了电压稳定剂的迁移。经过 360 h 的 150 °C 二次老化后,修复电缆的特征

电树起始电压较未修复电缆高出 66.90%,表明该方法具有较好的迁移抵抗能力和抑制老化电缆电树的效果。然而,该研究的实验条件较为简单,只是进行了短期的二次老化,且仅仅注入了一种电压稳定剂,因此其实际应用范围和效果还需要进一步研究和探讨。另外,该方法需要注入电压稳定剂进行修复,而且修复效果可能会受到注入量、注入位置等因素的影响,需要进一步优化。

Yang 等^[42]指出设计自愈合电介质聚合物是面临着巨大挑战的,其中电树老化过程是一个复杂的多尺度特性,而且恶劣的工作条件也会对其造成不利影响。传统的嵌入自愈剂的自愈策略可能会引入不均匀性和绝缘缺陷,从而导致在电场下局部应力增强和电损伤的概率增加。Sima 等^[43]针对电树的自修复问题,提出了一种新型的智能绝缘材料,具有物理和电学的双重损伤自愈能力。该研究采用 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ 和 TiO_2 纳米颗粒作为磁性目标和紫外线屏蔽层,并构建了功能性微胶囊,以保证自修复剂的低掺杂浓度和自愈能力,利用电树发光实现自动触发紫外线诱导的自修复剂聚合,实现了智能、非接触式的自愈绝缘材料。然而,该方法还存在一些局限性:研究主要集中在实验室规模下,需要更多的实验验证和扩大化应用;纳米颗粒在制备和应用中可能会引起环境和健康问题,需要进行进一步研究和评估;研究中使用的光触发方法可能存在光衰和使用寿命问题,需要进行更多的改进和优化。

5 电树老化面临的挑战

尽管大量的科研学者已经对 XLPE 电缆的电树老化现象进行几十年的研究与探索,并且取得长足的进展,但未来仍然面临着以下有待解决的问题:

(1) 电缆在长期运行过程中绝缘材料内部发生电树老化现象的机理尚不明确。对于电树老化现象,虽然科研学者们已经提出了大量的理论和模型,但它们大部分往往只涉及一个或两个影响因素,而电树的形成是与电场、温度和机械应力等多物理场密切相关的复杂过程,所以对于电树老化的机理至今都没有一个完美的解释。此外,目前相关的研究还停留在理论分析的层面,后续的研究应该全面地探索多物理场下的电树老化机理,并通过有效的实验和模拟来证实其理论。

(2) XLPE 电缆的电树老化现象不可避免,要实现绝缘材料电树老化状态的快速、精准和无损检测仍然具有挑战性。目前对电树老化的诊断方法大多基于局部放电信号的测量,通过局部放电脉冲的时域和频域特征可以对电树进行定位和分类。但高频下的局部放电信号因在长电缆中衰减而难以识别,并且在测试过程中需要高电压产生局部放电,可能会对电缆造成损伤。此外,时域反射和宽频阻抗谱等无损检测方法具有测试难度大、灵敏度过高等缺点难以广泛地

应用^[40,44]。因此,未来的工作应在避免二次损伤的前提下,继续深入研究可以高效、准确评估电树老化状态的诊断方法。

(3)如何完全消除电树老化带来的负面影响一直是一个难以突破的瓶颈。添加无机纳米颗粒和电压稳定剂是提高电树起始电压、抑制电树生长的常用手段,但由于纳米填料的团聚以及有机添加剂与其它助剂在高温下发生化学反应的缘故,会显著降低绝缘材料的性能。近年来,聚合物材料中电树的靶向自愈技术引起了科学学者的广泛关注,但这一新兴技术尚不成熟,具有愈合效率低、消耗大和成本高等缺点有待解决^[42-43]。此外,今后的工作应以电树老化的机理研究作为理论指导,积极探索一种可行、高效且环保的方法来彻底消除绝缘材料中的电树老化现象。

6 结语

电树老化是导致XLPE电缆绝缘失效的一种预击穿现象,电树的形成会大幅度降低电缆的绝缘性能和使用寿命,是威胁城市电力系统安全运行的主要问题之一。因此,了解电树的特征、理论模型以及影响因素是十分有必要的,后续的工作中应针对XLPE电缆中电树老化的机理展开深入、全面的研究,这可以为科学家们进一步研究如何彻底消除电树带来的负面影响打下良好的基础。

参考文献

- [1] 邵森安,等.电线电缆,2021(3):1-6.
Shao Senan, et al. Electric Wire & Cable, 2021(3):1-6.
- [2] 李盛涛,等.高电压技术,2018,44(5):1 399-1 411.
Li Shengtao, et al. High Voltage Engineering, 2018, 44(5):1 399-1 411.
- [3] Ohki Y. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2018, 34(4):62-65.
- [4] 尹游,等.工程塑料应用,2022,50(9):115-120.
Yin You, et al. Engineering Plastics Application, 2022, 50(9):115-120.
- [5] 陈新,等.高电压技术,2020,46(5):1 571-1 579.
Chen Xin, et al. High Voltage Engineering, 2020, 46(5):1 571-1 579.
- [6] Li Y S, et al. Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering, 2021, 14(1):114-121.
- [7] 陈向荣,等.物理学报,2012,61(8):416-425.
Chen Xiangrong, et al. Acta Physica Sinica, 2012, 61(8):416-425.
- [8] 谢安生,等.高电压技术,2007(6):168-173.
Xie Ansheng, et al. High Voltage Engineering, 2007(6):168-173.
- [9] 李伟,等.绝缘材料,2016,49(11):36-44.
Li Wei, et al. Insulating Materials, 2016, 49(11):36-44.
- [10] Kitchin D, et al. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Part III Power Apparatus & Systems, 1958, 77(3):180-186.
- [11] 王洪新,等.高电压技术,2003(6):19-21.
Wang Hongxin, et al. High Voltage Engineering, 2003(6):19-21.
- [12] 郑晓泉,等.中国电机工程学报,2004(3):145-149.
Zheng Xiaoquan, et al. Proceedings of the CSEE, 2004(3):145-149.
- [13] Liu H, et al. IEEE Access, 2018, 6:62 890-62 897. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2877039.
- [14] Liu H, et al. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(6):1 965-1 972.
- [15] 陈讴,等.工程塑料应用,2017,45(11):108-112.
Chen Ou, et al. Engineering Plastics Application, 2017, 45(11):108-112.
- [16] 周凯,等.绝缘材料,2019,52(2):7-14.
Zhou Kai, et al. Insulating Materials, 2019, 52(2):7-14.
- [17] Crine J P. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(4):791-800.
- [18] Zhu M X, et al. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(4):1 128-1 135.
- [19] Zhu X, et al. High Voltage, 2021, 6(5):782-792.
- [20] Laurent C, et al. Journal of Applied Physics, 1985, 58(11):4 346-4 353.
- [21] Vidya M S, et al. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47(11):14 293-14 304.
- [22] Yuan C, et al. Applied Physics Letters, 2023, 122(11). DOI: 10.1063/5.0133417..
- [23] Zhao L, et al. AIP Advances, 2020, 10(3). DOI: 10.1063/1.5110273.
- [24] Ding H Z, et al. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(1):81-89.
- [25] Danikas M G, et al. Engineering Technology & Applied Science Research, 2019, 9(1):3 750-3 756.
- [26] 徐庆文,等.高电压技术,2022. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220442.
Xu Qingwen, et al. High Voltage Engineering, 2022:1-10. DOI: 10.13336/j.1003-6 520.hve.20220442.
- [27] 彭苏蔓,等.中国电机工程学报,2020,40(12):4 033-4 043.
Peng Suman, et al. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12):4 033-4 043.
- [28] Zhao X, Zhang S, Lin C, et al. Characterization of electrical treeing in XLPE versus temperature gradients[C]//2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics. Valencia, Spain: IEEE, 2020:25-28.
- [29] Sahoo G, Sahoo B, Karmakar S, et al. Analysis of electrical tree growth in crossed link polyethylene cable insulation under different AC voltages[C]//2020 IEEE 9th Power India International Conference. Sonapat, India:IEEE, 2020:1-5.
- [30] Sahoo R, Karmakar S. Electrical tree growth structural analysis of XLPE cable insulation under different AC voltage[C]//2021 IEEE 5th International Conference on Condition Assessment Tech-

- niques in Electrical Systems. Kozhikode, India:IEEE,2021:5–10.
- [31] 杜伯学,等.高电压技术,2017,43(2):344–354.
Du Boxue, et al. High Voltage Engineering, 2017, 43(2):344–354.
- [32] Liu Y, et al. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(6):3 676–3 684.
- [33] Liu H C, et al. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(6):1 965–1 972.
- [34] Zhang H L, et al. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(4):1 234–1 241.
- [35] Du B X, et al. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(4):1 801–1 808.
- [36] Liu H, et al. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4):2 282–2 290.
- [37] Zhu L, et al. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8):1–4.
- [38] Sarathi R, et al. Polymer Testing, 2004, 23(8):863–869.
- [39] Hammarström T, et al. IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation, 2021, 28(5):1 669–1 676.
- [40] 刘骥,等.电工技术学报,2022:1–10. DOI:10.19595/j.cnki.1000–6 753.tces.212081.
Liu Ji, et al. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022: 1–10. DOI:10.19595/j.cnki.1000–6 753.tces.212081.
- [41] Li M, et al. Journal of Polymer Research, 2022, 29(11):470.
- [42] Yang Y, et al. Advanced Science, 2020, 7(21):2002131.
- [43] Sima W, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(28): 33 485–33 495.
- [44] 张成,等.绝缘材料,2020,53(7):1–11.
Zhang Cheng, et al. Insulating Materials, 2020, 53(7):1–11.
-
- (上接第 164 页)
- [42] Chen W H, et al. Journal of Polymer Research, 2009, 16(5): 601–610.
- [43] Lyu L N, et al. Materials Letters, 2020, 258(1). DOI: 10.1016/j.matlet.2019.126653.
- [44] Gao Q Z, et al. Journal of Coatings Technology and Research, 2011, 8(1):61–66.
- [45] Chen G X, et al. Progress in Organic Coatings, 2016, 93 :11–16.
- [46] Jiao X J, et al. ACS omega, 2022, 7(15):12 680–12 689.
- [47] Dai M W, et al. Applied Polymer Science, 2020, 138(9). DOI: 10.1002/app.49913.
- [48] Cheng F, et al. Coatings, 2020, 10(7). DOI: 10.3390/coatings10070675.
- [49] Fan Y X, et al. Progress in Organic Coatings, 2022, 163. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106624.
- [50] Park J M, et al. Polymer Bulletin, 2015, 72(8):1 921–1 936.
- [51] Li X Y, et al. International Journal of Polymeric Materials & Polymeric Biomaterials, 2017, 66(15a18). DOI: 10.1080/00914037.2016.1276063.
- [52] Khwanmuang P, et al. Progress in Organic Coatings, 2017, 110: 104–113.
- [53] Pyo S H, et al. ACS Appl Mater Interfaces, 2017, 9(1):836–844.
- [54] Wang W C, et al. ACS applied materials & interfaces, 2022, 14(2): 3 324–3 333.
- [55] Gokyer S, et al. ACS Biomaterials Science & Engineering, 2021, 7 (11):5 189–5 205.
- [56] Balcioglu S, et al. International journal of biological macromolecules, 2021, 192:1 344–1 356.
- [57] Hou Y, et al. RSC Advances, 2020, 10(9):4 907–4 915.
- [58] He M L, et al. Bioconjugate Chemistry, 2021, 32(8):1 915–1 925.