

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.04.004

机械应力影响环氧树脂绝缘电树枝劣化研究进展

张莹^{1,2}, 宋慧欣^{1,2}, 王冬梅^{1,2}, 孔晓晓³, 杜伯学³

(1. 国网冀北电力有限公司技能培训中心, 河北 保定 071051; 2. 保定电力职业技术学院, 河北 保定 071051;
3. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300721)

摘要: 环氧树脂凭借其优异的电气绝缘、耐热与机械性能以及良好的可塑性,被广泛应用于支撑绝缘子、绝缘拉杆等电气设备绝缘部件。随着电气设备电压等级的提高,环氧树脂绝缘部件运行工况日趋严苛,机械应力带来的绝缘失效问题更为突出。根据国内外参考文献,文中综述了机械应力下环氧树脂电树枝劣化引发绝缘击穿现象的研究进展。根据环氧树脂承受应力的不同,介绍了拉伸、压缩应力下电树枝生长的形貌特征,总结了温度工况下机械应力对电树枝生长的影响规律。基于环氧树脂分子链的物理微观结构与电荷输运特性,从能量角度探讨了绝缘材料在机械应力下的电树枝劣化机理。阐述了电气设备环氧绝缘部件的电树枝研究的关键问题与解决思路,为开发高绝缘性能的环氧树脂绝缘材料提供了参考。

关键词: 环氧树脂; 拉伸应力; 压缩应力; 温度梯度; 电树枝; 绝缘击穿

Research Progress on Influence of Mechanical Stress on Electrical Tree Deterioration of Epoxy Resin Insulation

ZHANG Ying^{1,2}, SONG Huixin^{1,2}, WANG Dongmei^{1,2}, KONG Xiaoxiao³, DU Boxue³

(1. Skills Training Center of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Heibei Baoding 071051, China; 2. Baoding Electric Power Vocational and Technical College, Heibei Baoding 071051, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300721, China)

Abstract: Epoxy resin is widely used as such insulation parts of electrical equipment as support insulators and insulating rods due to its excellent electrical insulation, heat resistance, mechanical properties and good plasticity. With the increase of voltage level of electrical equipment, the operation is becoming more and more critical and the insulation failure caused by mechanical stress is becoming more prominent. Based on the reference both at home and abroad, the research progress on insulation breakdown due to electrical tree deterioration of epoxy resin under mechanical stress is reviewed in this paper. The morphological characteristics of electrical tree growth under tensile and compressive stresses are introduced on the bases of different bearing stresses of epoxy resins, and the influence of mechanical stress on electrical tree growth under temperature conditions is summarized. The mechanism of electrical tree deterioration of insulation materials under mechanical stress is explored based on the physical micro-structure and charge transport characteristics of epoxy resin molecular chains and also from an energy perspective. The key issues and solutions for the study of electrical tree branches in epoxy insulation components of electrical equipment is described, which provides a reference for the development of epoxy resin insulation materials with high insulation performance.

Key words: epoxy resin; tensile stress; compressive stress; temperature gradient; electrical tree; insulation breakdown

收稿日期:2023-12-08; 修回日期:2024-02-04

基金项目:河北省高等学校科学技术研究项目(QN2023073)。

Project Supported by Science and Technology Project of Hebei Education Department(QN2023073).

0 引言

环氧树脂指含有环氧基团的高分子聚合物,具有优异的绝缘性能和高耐腐蚀性,广泛应用于电力行业中胶粘剂、电器绝缘件浇注、胶浸纸套管、电子元件灌封、绝缘拉杆等多个领域^[1-4]。作为电气设备绝缘的关键材料,环氧树脂的介电性能、机械强度、抗老化性能直接影响电力系统的安全可靠运行^[5-8]。

近年来,电气设备厂家对环氧树脂生产、制作工艺均有所提升,但环氧树脂绝缘部件故障仍频繁发生,其中环氧树脂材料的机械性能问题更为突出。2014年,崔博源等发现1100 kV特高压用环氧浇筑盆式绝缘子发生炸裂故障^[9];2015年,何喜梅等发现青海某750 kV气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)绝缘子出现故障,最终引发跳闸事故^[10];2016年,陈允等发现1100 kV GIS用盆式绝缘子树脂与嵌件的连接处易发生绝缘击穿故障^[11];2019年,梁虎成等发现超高压盆式绝缘子内部应力集中是其机械可靠性的主要威胁^[12]。分析认为,复杂应力工况和局部电场畸变是导致环氧树脂绝缘部件发生击穿故障的主要原因。随着电气设备电压等级不断提高,环氧树脂绝缘部件制作工艺更加复杂,其绝缘与机械性能面临着更为苛刻的要求。

电树枝现象与绝缘介质局部放电行为密切相关^[13],是环氧树脂绝缘部件击穿的主要诱因,严重威胁电气设备的安全可靠运行^[14]。在外施电场作用下,空间电荷入陷、脱陷、复合过程释放能量并加速聚合物分子链降解,最终形成低密度区^[15]。随着分子链损伤的累积,在低密度区产生缺陷,在外施电压作用下发生极化现象,产生极化电荷积累形成局域强电场^[16]。当局域电场强度超过此绝缘薄弱区域击穿临界值时,诱发局部放电,多次局部放电形成电树枝通道。综上,机械应力通过改变环氧树脂物理微观结构,影响电荷输运特性,最终导致电树枝的生长过程发生变化。环氧树脂电树枝击穿问题严重制约电力系统安全可靠运行,全面深入地厘清环氧树脂绝缘材料在机械应力场下电树枝生长机理,对保证电工装备可靠运行具有重要意义^[17-18]。

文中结合环氧绝缘部件典型运行工况,综合考虑机械应力、温度—机械应力及温度梯度—机械应力共同作用介绍了环氧树脂电树枝的生长规律,从微观结构、电荷输运角度总结了机械应力下电树枝生长机理,并论述了环氧树脂绝缘电树枝研究的展望。

1 环氧树脂绝缘承受机械应力

作为电气设备绝缘的关键材料,环氧树脂在长期运行过程中承受着机械应力作用,如由重力、热应力等引起的静态机械应力,以及冲击作用下的动态应力等。根据形成原因的不同,环氧树脂绝缘承受机械应力可分为5类^[19-20]:①在绝缘件制造过程中,由于固化不均匀导致热和化学收缩不同引起的内部残余应力;②导体重力和电应力引起的应力;③由于环氧树脂、导体、嵌件及填料的线胀系数不同,在导体热量和环境温度的影响下,绝缘材料承受的热膨胀应力;④由于环氧树脂绝缘内部承受温度梯度,不同区域因热胀不均产生的应力;⑤运输过程中颠簸、紧急刹车等导致绝缘件底部产生较大瞬时弯曲引起的残余应力。

环氧树脂制绝缘部件在运行过程中承受多种典型机械应力,110 kV GIS盆式绝缘子在水平铺设时,承受最大拉伸应力27 MPa,集中于绝缘体和导体之间上界面;而压缩应力则位于绝缘体边缘和绝缘体与导体之间的下界面上,最大压缩应力为29 MPa,见图1^[12]。在运行过程中,由于铝导体的热膨胀系数($23.21 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)和环氧树脂的热膨胀系数($56.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)不同,环氧树脂承受导体发热引起的热膨胀应力。绝缘拉杆作为气体绝缘开关设备(GIS)断路器的关键部件,在分、合闸冲击过程中承受推、拉作用,使绝缘拉杆用环氧树脂承受动态拉伸或压缩应力^[21]。文[22]发现252 kV断路器中,直径 $\varphi=30 \text{ mm}$ 绝缘拉杆在运行过程中承受的拉力峰值接近35 MPa,冲击响应频率主要分布在600 Hz以下。研究表明,1100 kV GIL三支柱绝缘子在运输状态下连接筒边缘的最大应力为55.48 MPa^[23]。

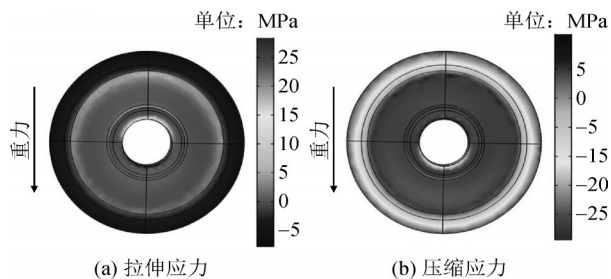


图1 110 kV GIS绝缘子的应力分布

Fig. 1 Stress distribute on of the 110 kV GIS insulator

电气设备电压等级不断提升,环氧树脂绝缘部件尺寸随之增加,在制造和运行过程中承受机械应力更为复杂,环氧树脂绝缘性能受应力作用影响更为突出^[24]。因此,有必要全面深入揭示机械应力下环氧树脂绝缘电树枝生长规律及机理,满足环氧树

脂部件绝缘性能与机械应力设计需求。

2 机械应力对环氧树脂电树枝生长的影响

机械应力通过调整聚合物分子链排列顺序,影响电荷输运过程,从而对环氧树脂绝缘劣化行为产生影响^[25]。近年来,专家学者们重点分析了拉伸、压缩应力下环氧树脂绝缘电树枝生长特性。

2.1 拉伸应力对电树枝生长的影响

基于拉伸应力环氧树脂电树枝劣化测试平台,杜伯学等研究了环氧树脂在拉伸应力作用下电树枝生长特性,从微观分子结构角度论述了电树枝的生长机理^[26]。拉伸应力的方向与针电极垂直,加压25 min时电树枝形态见图2。随着拉伸应力的增加,电树枝通道变长,并有明显的沿拉伸应力方向扩展的趋势,如箭头所示。拉伸应力使得环氧树脂化学键结构与分子链段产生结构性缺陷,极化电荷在缺陷附近积聚造成局域电场畸变^[27],从而加速电树枝生长过程。李树美等测试了机械应力下玻璃纤维/环氧树脂复合材料的绝缘击穿性能,发现随着拉伸应力增大,复合材料的击穿强度显著下降^[28]。

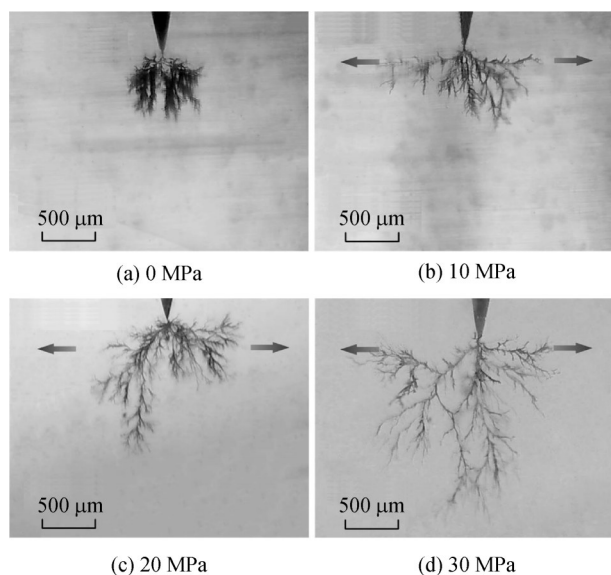


图2 拉伸应力下电树枝形貌特征

Fig. 2 Electrical tree morphology under tensile stress

从施加电压开始,至电树枝发生击穿的时间为电树枝击穿时间。15 kV电压等级下,拉伸应力与电树枝击穿时间的关系^[29]见图3。结果表明,随着拉伸应力的增加,电树枝平均击穿时间显著降低,由59 min下降至39 min,表明拉伸应力显著加速了环氧树脂的绝缘劣化现象,这与图2的规律一致。

在环氧树脂固化过程中,由于环氧树脂和金属针电极的收缩率不同,会导致内部应力的产生,尤其是拉伸应力^[30]。Shin Nakamura等人通过光弹性

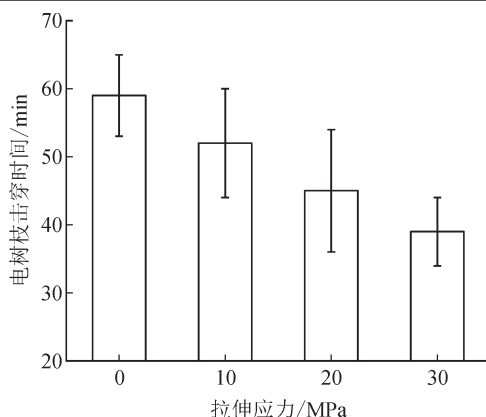


图3 拉伸应力对电树枝击穿时间的影响

Fig. 3 Effect of tensile stress on the breakdown time of electrical tree

法观察到,环氧树脂内部应力导致电树枝沿着远离施加电场的方向生长,并沿着应力方向扩展,见图4。此外,针电极前侧的拉伸应力集中现象在高温下得到消除,在20 °C时,环氧树脂内部拉伸应力很大。然而在140 °C时,内部应力趋于缓解,证实一定的机械应力在高温下得到释放。温度产生的热应力改变环氧树脂的应力分布,从而影响电树枝行为。陈允等研究了高温下机械应力对环氧树脂电树枝的形态特征的影响,讨论了高温下应力分布和分子链行为^[31]。研究发现,拉伸应力导致电树枝破坏面积增大,且高温加速了电树枝生长过程。高温使分子动能增加,随着强烈的分子热运动,环氧树脂分子链发生链段松弛,从而导致分子链更易断裂^[32]。同时,高温下载流子的迁移速度快,获得的能量较高而形成热电子,热电子撞击并破坏分子链而引发电树枝。虽然光弹性法为观察环氧树脂电树枝形态和应力分布提供了新思路,但不透明环氧固化材料的应力观测方法仍需进一步研究。

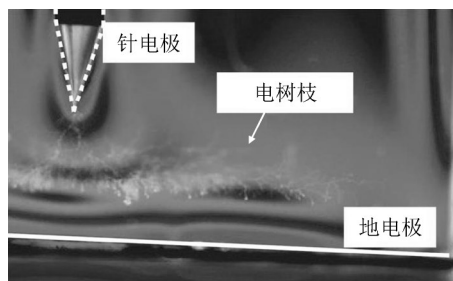


图4 用光弹性方法观察环氧树脂中应力分布与电树枝

Fig. 4 Observation of stress distribution and electrical tree in epoxy resin by photo-elastic method

机械应力改变环氧树脂分子链构象,进而影响其电荷输运特性与电树枝生长行为。目前国内外研究人员大多关注未添加填料的环氧树脂电树枝行为,机械应力下环氧树脂复合材料绝缘介质电树枝特性的探究,值得专家学者的高度重视。此外,

环氧绝缘部件在运行中承受不同方向应力,目前大多关注垂直于电场的机械应力下环氧树脂绝缘电树枝生长规律,但平行于电场的机械应力作用对电树枝生长的影响仍需进一步实验探索。

2.2 压缩应力对电树枝生长的影响

基于压缩应力电树枝劣化测试平台,学者们讨论了压缩应力与环氧树脂电树枝生长特性之间的关系。S. A. Al-Ghamdi等发现机械压力预处理可显著降低电树枝引发概率,延缓环氧树脂电树枝劣化进程^[33]。当交流电压的幅值固定为15 kV,不同压缩应力下环氧树脂的电树枝形态^[26]见图5。从图5可以看出,未压缩试样的电树枝具有通道短、劣化区域小的特征,电树枝形态呈丛林状。当施加10 MPa压缩应力时,电树枝累积损伤面积明显减小。随着外施压缩应力的进一步增加,电树枝长度和累积损伤增大。由此推测,适当的压缩应力可以延缓电树枝的生长。当压缩应力继续增大时,电树枝通道的数量和长度增加,对绝缘安全具有更大的威胁。此外,如箭头所示,在压缩应力作用下,电树枝主要向地电极传播,即垂直于压缩应力的方向。

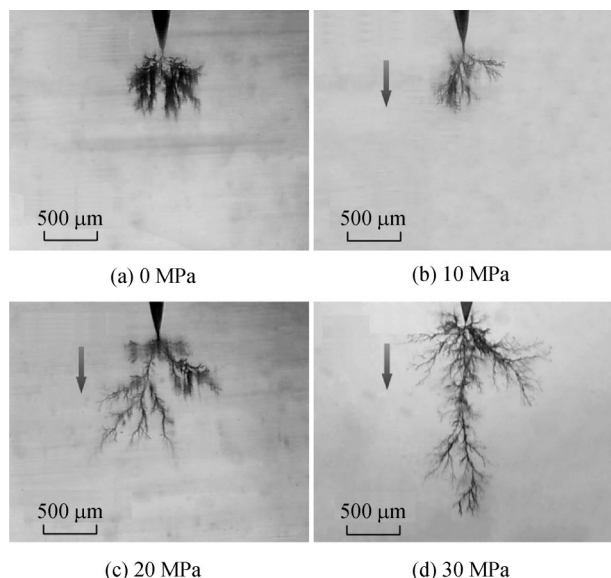


图5 压缩应力的电树枝形貌特征

Fig. 5 Electrical tree morphology under compressive stress

路士杰研究发现,挤压应力作用下环氧树脂物理微观结构改变,绝缘介电性能下降,挤压应力越大其绝缘劣化越严重^[34]。而且与无缺陷试样相比,挤压应力破坏环氧树脂分子结构导致电场畸变严重,从而诱发局部放电形成电树枝通道,加速环氧树脂降解过程。

加压15 min时,不同温度梯度下压缩应力与电树枝长度的关系^[29]见图6。从图6可以看出,不同温度梯度下10 MPa压缩应力的电树枝抑制效果最优。当接地侧温度较高时,随着电树枝生长,树枝

通道的末端温度会升高。高温区域会加剧分子链的热运动,降低分子链断裂的能量阈值^[35],使得环氧树脂内部更易形成缺陷加速电树枝劣化。而当高压侧温度较高时,高压侧温度较高时肖特基注入增强,注入电荷量增加^[36],电荷从高温侧迁移到低温侧时,迁移率会降低。低温区域的空间电荷积累会导致电场发生畸变,进一步增加局部放电的发生^[37],从而促进电树枝向地电极侧生长。但温度梯度场作用下,多种机械应力对环氧树脂复合材料电树枝劣化的影响规律仍缺乏系统性研究,电荷输运与电树枝生长之间的作用规律与关联关系有待进一步深入探索。

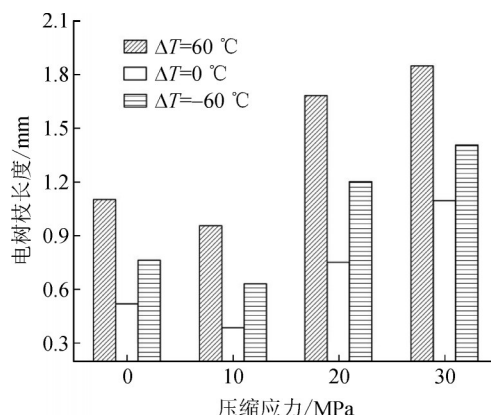


图6 压缩应力对电树枝长度的影响

Fig. 6 Effect of compressive stress on electrical tree length

综上,以往针对环氧树脂绝缘电树枝行为的研究大多以纯环氧树脂试样作为载体,但在实际工业生产应用中多采用环氧树脂/填料复合体系。传统的电树枝光学观测手段无法应用于透明度低的绝缘材料,亟需寻求新的非光学检测手段实现电树枝形态的间接观测。同时,在实际应用中,环氧树脂绝缘部件受力情况复杂,剪切应力、热膨胀应力及拉压应力耦合对其绝缘性能的影响研究相对匮乏,同时不同方向应力场与温度场耦合作用下环氧树脂电树枝行为特性还需系统分析以全面评估环氧部件绝缘性能。

3 基于环氧树脂微观结构的电树枝生长机理

机械应力下绝缘介质电树枝生长机理与局部放电行为密切相关,涉及物理微观结构、电荷输运等因素作用^[38]。本节将首先论述机械应力对这2个方面的影响,然后在此基础上综述机械应力作用下环氧树脂绝缘电树枝生长机理。

3.1 机械应力对环氧树脂物理微观结构的影响

为探究机械应力对聚合物分子微观结构的影响,学者利用分子动力学仿真模拟方法探究环氧树脂机械应力和微观结构的关联性^[39],发现随着拉伸

应力的增加,环氧树脂分子链之间的范德华和静电相互作用减弱,分子链之间的物理交联减弱,从而内聚能降低,即分子链断裂阈值降低。因此,拉伸应力加速分子链断裂形成内部缺陷,促进极化电荷在缺陷附近积聚形成局域强场,增加局部放电发生概率^[40],进而促进电树枝生长过程。此外,不同拉伸应力下,环氧树脂静电相互作用能的变化很小,而范德华相互作用能的变化更明显。因此,可以推断在拉伸应力下,范德华相互作用能在改变环氧树脂内聚能密度方面起着更重要的作用。当压缩比从0增加到3%时,内聚能密度显著升高,从413.33 J/cm³上升到420.15 J/cm³。由此推断,压缩应力增强了环氧树脂分子链间作用力,提高了分子链断裂阈值。压缩应力下环氧树脂内聚能密度在升高,分子链不易被打断,从而环氧树脂内部微缺陷不易形成,局域畸变电场强度不够高,从而抑制电树枝的生长。这从微观结构角度解释了适当的压缩应力可以延缓电树枝的生长。

3.2 机械应力对环氧树脂电荷输运的影响

机械应力破坏环氧树脂聚合物分子链结构,进而影响其电荷输运行为。刘鹏等研究发现压缩应力使环氧树脂内部空间电荷密度显著升高,陷阱密度增加,见图7^[41]。分析认为由于环氧树脂杨氏模量较大,机械应力下样品厚度并未发生明显变化,但是环氧树脂内部仍然可能出现微观界面或薄弱点,使得陷阱数量增多,电子平均自由行程缩短,载流子获得的能量降低而导致被陷阱捕获的概率升高,从而降低载流子迁移率。郭鹏翔等通过仿真计算了压缩、初始、拉伸状态的视在极化强度分别为4.11、4.45、4.83 Debye^[39],拉伸应力促进了环氧树脂的极化行为,压缩应力使其极化行为呈现相反的趋势,极化率降低。

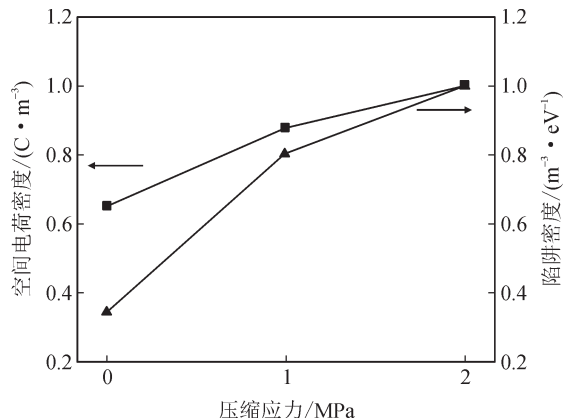


图7 不同压缩应力下环氧树脂空间电荷密度和陷阱密度
Fig. 7 The space charge density and trap density in epoxy resin under different compressive stresses

环氧树脂分子局域态和极化的变化影响电荷输运特性和局部电场强度^[42]。在外电场的作用下,空间电荷入陷、脱陷和复合过程中释放的能量以热电子或光子的形式辐射破坏环氧树脂分子链,形成大分子自由基,从而催化绝缘介质的链降解反应,形成低密度区域,最终形成空腔缺陷。在电场的作用下,空腔会形成极化电荷。随着极化强度的增加,空间电荷积累量增加,增加局部电场畸变程度。综上所述,机械应力主要通过改变环氧树脂内部物理微观结构影响电荷输运过程,从而改变局域电场的分布。

除了环氧树脂,专家学者们还探究了机械应力对其它绝缘材料内部空间电荷的影响。王灿等发现拉伸状态下,聚乙烯内部电荷更易被陷阱捕获形成空间电荷包^[43]。王霞等人发现随着硅橡胶拉伸率的增加,电荷积聚量呈现先减少后增加的趋势,为电缆附件开发与应用提供指导^[44]。机械应力对绝缘材料空间电荷影响的研究取得了一些成果,但机械应力对其空间电荷输运特性和电树枝生长规律的关联机制尚不明晰。目前电树枝劣化的测试和空间电荷的测量是分开进行的,如何实现电树枝生长行为和空间电荷的同步实时测量,仍需要进一步理论和实验研究。

3.3 机械应力下环氧树脂电树枝生长机理

文[26]指出,机械应力改变环氧树脂的微观结构,同时影响绝缘材料内部机械能的分布,从而改变电树枝的生长过程。学者们通过计算机机械应力作用下电树枝的驱动能量,得到机械应力与聚合物电树枝劣化的作用关系。当其他参数不变时,电树枝生长驱动能量 P 是关于机械应力 σ 的一元二次函数,对称轴 $\sigma_1 = -0.5eY$ 。其中, e 为应变水平, Y 是弹性模量。当外施电压 U 不够大,且机械应力较小时,电树枝不会发生。随着机械应力的增加,电树枝生长驱动能量增加,容易引发电树枝。当 U 足够大,拉伸应力 $+\sigma$ 增大时, P 增加,即电树枝更易引发和生长。当压缩应力 $-\sigma$ 增大时, P 先减小后增加,电树枝的生长呈现非线性趋势。这解释了图5的变化规律,适当的压缩应力可以延缓电树枝的生长过程。

环氧树脂内部缺陷形成和电树枝之间的逻辑关系可以描述如下。在环氧树脂绝缘部件的制造、运输和运行过程中,可能会出现气隙和裂纹等缺陷。环氧树脂缺陷对其内部机械应力和局域电场分布产生重要影响^[45]。缺陷对机械应力的影响见图8。从图8可以看出,在微孔末端产生局部应力集中,这可能对缺陷的发展方向产生重要影响。微孔周围

的电场分布见图9。对于初始缺陷,微孔通常是未碳化的,电场集中位于微孔内部,见图9(a)。因此,当局部电场强度超过放电临界值时,诱发局部放电。微孔内部可能会引发多次局部放电,分解环氧树脂并使微孔表面碳化^[46]。此时,微孔外部区域电场集中易诱发局部放电,见图9(b)。文[47]指出,局部放电导致树枝生长,树枝生长速率与局部放电幅值成正比。多次局部放电可形成电树枝,最终导致聚合物击穿。电树枝在拉伸应力和压缩应力下生长特性存在明显差异,拉伸应力降低了分子链断裂阈值,促进了缺陷沿拉应力方向的扩展,电树枝出现沿着拉伸应力方向生长的趋势。适当的压缩应力可以延缓电树枝生长,因此由于预加应力而产生的压缩应力会减缓电树枝生长速度,并增加电树枝击穿时间,但压缩应力过大时,应力直接破坏环氧树脂分子链,在其内部产生微缺陷而加速电树枝劣化。B. R. Varlow等通过在环氧树脂固化过程中拉伸纤维建立一个可控的压缩应力区域,发现这可以提高环氧树脂耐电树枝性能,证实了适当压缩应力能够增强电树枝生长抑制能力^[48]。

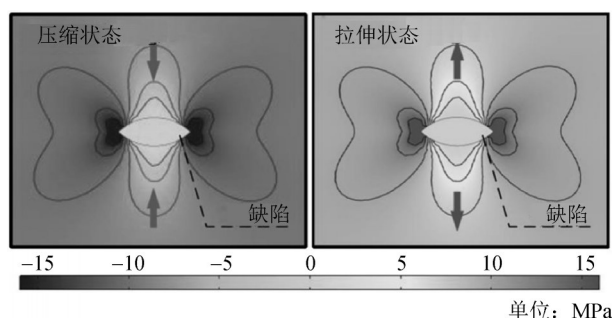
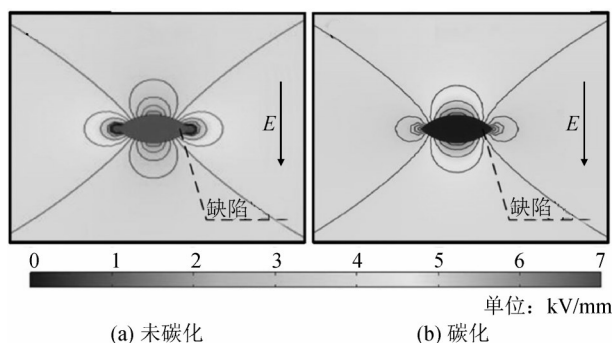


图8 缺陷对机械应力的影响

Fig. 8 Effects of defects on mechanical stress



(a) 未碳化

(b) 碳化

图9 缺陷对电场分布的影响

Fig. 9 Effects of defects on electric field distributions

目前基于机械应力下环氧树脂内聚能与电荷输运特性的电树枝劣化作用机理的研究取得了一定进展。但电树枝生长机理的研究仍然处于探索阶段,理论体系尚不成系统,很多方面尚未开展深入研究。电树枝生长机理基本局限于单一因素的影响,温度—机械应力、温度梯度—机械应力共同

作用下环氧树脂绝缘内部微观结构、电荷输运与其电树枝生长之间的关系有待进一步探索。

4 结论与展望

文中针对目前环氧树脂绝缘电树枝劣化引起的绝缘破坏问题,围绕电树枝生长行为与生长机理展开研究。考虑环氧树脂绝缘的拉伸应力、压缩应力及机械应力—温度梯度共同作用等运行工况,结合机械应力对环氧树脂微观结构、电荷输运行为的影响,基于电应力和机械应力作用下电树枝生长驱动能量的计算结果,从能量角度分析了机械应力作用下电树枝的生长机理。基于文中的综述,对未来环氧树脂绝缘电树枝生长研究进行如下展望:

1)环氧树脂绝缘部件在实际运行中承受复杂应力,而目前仅针对垂直针电极的机械应力下电树枝行为进行了研究。剪切应力、拉压应力耦合及其他应力方向等因素对环氧树脂电树枝生长行为的影响还需进行系统、全面的分析,以全面反映环氧绝缘部件电气性能。

2)目前环氧树脂电树枝行为评估主要集中于电树枝长度、累积损伤,然而电树枝缺陷以及空间电荷动态迁移均会影响聚合物局部放电过程。因此,迫切需要探索电树枝生长过程中空间电荷的实时测量方法,以便为揭示电树枝引发与生长机理提供有效研究手段。

3)在设计环氧树脂绝缘部件时,需要兼顾热应力和机械应力的影响,温度—机械应力及温度梯度—机械应力共同作用下环氧树脂物理微观结构与其电树枝生长特性的关联关系尚不明确。此外,在实际工作过程中,环氧树脂固化物需要添加高含量的填料导致缺乏透明度,因此需要在进一步的研究中加以改进,寻求新的非光学检测手段对应力分布进行可视化获取。

参考文献:

- [1] WANG M Y, DU B X, HAN X T, et al. Effects of magnetic field on partial discharge in epoxy resin for superconducting coil insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 31(8): 1-3.
- [2] 陈平, 刘胜平, 王德中. 环氧树脂及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
CHEN Ping, LIU Shengping, WANG Dezhong. Epoxy resin and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [3] 闫纪源, 梁贵书, 段祺君, 等. 等离子体表面阶跃型梯度

- 硅沉积对环氧树脂闪络性能的影响[J]. 电工技术学报, 2022, 37(9): 2377-2387.
- YAN Jiyuan, LIANG Guishu, DUAN Qijun, et al. Effect of plasma surface step gradient Silicon deposition on flashover properties of epoxy resin[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(9): 2377-2387.
- [4] 刘贺晨, 郭展鹏, 李 岩, 等. 衣康酸基环氧树脂和双酚 A 环氧树脂性能对比研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(9): 2366-2376.
- LIU Hechen, GUO Zhanpeng, LI Yan, et al. Comparative study on the performance of itaconic acid based epoxy resin and bisphenol A epoxy resin[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(9): 2366-2376.
- [5] 张苗苗. 脉冲电压与低温环境下环氧树脂电树枝生长特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- ZHANG Miaomiao. Electrical tree characteristics of epoxy resin under pulse voltage and low temperature[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [6] DU B X, TIAN M, SU J G, et al. DC-impulse voltage dependent electrical tree growth characteristics of epoxy resin in LN₂[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 1-5.
- [7] 曾向君, 王婷婷, 张福增, 等. 新型脂环族环氧树脂和硅橡胶材料性能对比研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(2): 146-152.
- ZENG Xiangjun, WANG Tingting, ZHANG Fuzeng, et al. Comparison of properties of new alicyclic epoxy resin and Silicone rubber[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 146-152.
- [8] 毕茂强, 彭 豪, 文 娅, 等. 纳米掺杂环氧树脂热力学性能的分子动力学模拟[J]. 电瓷避雷器, 2023(2): 142-149.
- BI Maoqiang, PENG Hao, WEN Ya, et al. Molecular dynamics simulation of the thermodynamic properties of nano - doped epoxy resins[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(2): 142-149.
- [9] 崔博源, 王宁华, 王承玉, 等. 特高压气体绝缘金属封闭开关设备用盆式绝缘子的质量控制[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3888-3894.
- CUI Boyuan, WANG Ninghua, WANG Chengyu, et al. Quality control for basin insulator used in gas insulated metal enclosed switchgear of ultra high voltage[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3888-3894.
- [10] 何喜梅, 陈文强, 王志惠, 等. 电网盆式绝缘子失效分析研究[J]. 青海电力, 2015, 34(2): 24-29.
- HE Ximei, CHEN Wenqiang, WANG Zhihui, et al. Analysis on the malfunction of basin - type insulator[J]. Qinghai Electric Power, 2015, 34(2): 24-29.
- [11] 陈 允, 崔博源, 王宁华, 等. 1 100 kV 气体绝缘开关设备用盆式绝缘子中心嵌件结构设计[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 564-570.
- CHEN Yun, CUI Boyuan, WANG Ninghua, et al. Structural design of central insert in basin - type insulator used for 1 100 kV GIS[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2): 564-570.
- [12] LIANG Hucheng, DU Boxue, LI Jin, et al. Mechanical stress distribution and risk assessment of 110 kV GIS insulator considering Al₂O₃ settlement[J]. High Voltage, 2019, 4(1): 65-71.
- [13] 苏金刚. 基于高压直流电缆附件的 EPDM 电树枝生长机理与抑制方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- SU Jingang. Growth mechanism and suppression methods of electrical tree in EPDM for HVDC cable accessory[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [14] LIU Ying, CAO Xiaolong. 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.
- [15] ZHANG Yunxiao, ZHANG Ling, ZHOU Yuanxiang, et al. Temperature dependence of DC electrical tree initiation in Silicone rubber considering defect type and polarity[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(5): 2694-2702.
- [16] ZHU L W, DU B X, SU J G, et al. Electrical treeing initiation and breakdown phenomenon in polypropylene under DC and pulse combined voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(1): 202-210.
- [17] 程子霞, 邢威威, 张云霄, 等. 纳米 MgO/环氧树脂复合材料的陷阱特性及对电树枝特性的影响研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(21): 5562-5569.
- CHENG Zixia, XING Weiwei, ZHANG Yunxiao, et al. Study on trap properties of nano - MgO/epoxy resin composites and its influence on electrical tree properties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21): 5562-5569.
- [18] 杜伯学, 张 莹, 孔晓晓, 等. 环氧树脂绝缘电树枝劣化研究进展[J]. 电工技术学报, 2022, 37(5): 1128-1135.
- DU Boxue, ZHANG Ying, KONG Xiaoxiao, et al. Research progress on electrical tree in epoxy resin insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(5): 1128-1135.
- [19] RUAN Kunpeng, ZHONG Xiao, SHI Xuetao, et al. Liquid crystal epoxy resins with high intrinsic thermal conductivities and their composites: A mini - review[J]. Materials Today Physics, 2021(20): 100456.
- [20] 孙曼灵. 热固性树脂基体的收缩与内应力[J]. 热固性树脂, 1993(4): 49-55.
- SUN Manling. Contraction and internal stress of thermosetting resin matrixes[J]. Thermosetting Resin, 1993(4): 49-55.
- [21] 王浩然, 陈 允, 吴泽华, 等. 断路器绝缘拉杆动态性能

- 模拟试验[J]. 电工技术学报, 2021, 36(z1): 311-320.
- WANG Haoran, CHEN Yun, WU Zehua, et al. Dynamic characteristics test of insulation pull rod for circuit breaker [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(z1): 311-320.
- [22] 乔桂花. 断路器绝缘拉杆的动态应力计算[J]. 华通技术, 2002(2): 25-28.
- QIAO Guihua. Dynamic stress calculation of circuit breaker insulation rod[J]. Huatong Technology, 2002(2): 25-28.
- [23] 贾云飞, 高璐, 汲胜昌, 等. 110 kV 气体绝缘金属封闭输电线路用三支柱绝缘子电气性能优化[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(7): 168-179.
- JIA Yunfei, GAO Lu, JI Shengchang, et al. Electrical performance optimization for tri-post insulator on 110 kV gas-insulated metal-enclosed transmission line[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(7): 168-179.
- [24] 刘通, 李洪涛, 刘建军, 等. 一起 GIS 盆式绝缘子应力开裂导致绝缘击穿故障[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 240-245.
- LIU Tong, LI Hongtao, LIU Jianjun, et al. Insulation breakdown fault caused by stress crack of GIS basin-type insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 240-245.
- [25] PARK C H, KANEKO T, HARA M, et al. Effects of mechanical stresses on the dielectric breakdown strengths of PET and FRP[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1982, EI-17(3): 234-240.
- [26] DU B X, ZHANG Y, KONG X X, et al. Morphological feature analysis of electrical tree growth in epoxy resin under tensile and compressive stress[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(1): 343-346.
- [27] DU B X, SU J G, HAN T. Effects of mechanical stretching on electrical treeing characteristics in EPDM[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(1): 84-93.
- [28] 刘树美. 温度和机械应力对 GF/EP 复合材料介电强度的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- LIU Shumei. Effects of temperature and mechanical stresses on the dielectric breakdown strength of GF/EP composites[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.
- [29] 张莹. 温度梯度与机械应力下环氧树脂电树枝生长机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.
- ZHANG Ying. Effects of temperature gradient and mechanical stress on electrical tree growth in epoxy resin [D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.
- [30] NAKAMURA S, KUMADA A. Effects of temperature on electrical treeing and partial discharges in epoxy/silica nano composites[J]. IEEE Transactions Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(4): 1169-1177.
- [31] LI Fan, DU Boxue, CHEN Yun, et al. Effects of mechanical stress on electrical tree growth in epoxy resin at high temperature[C]//2022 IEEE 4th International Conference on Dielectrics (ICD). Italy: IEEE, 2022: 609-612.
- [32] CHEN Xiangrong, XU Yang, CAO Xiaolong, et al. Electrical treeing behavior at high temperature in XLPE cable insulation samples[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(5): 2841-2851.
- [33] VARLOW B R, AL-GHAMDI S A. Treeing in heat-treated, mechanically pre-stressed electrical insulation[C]//2001 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No. 01CH37225). Canada: IEEE, 2001: 232-235.
- [34] 路士杰. 温度和机械应力对环氧树脂绝缘件沿面闪络特性的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- LU Shijie. Effects of temperature and mechanical stress on surface flashover characteristics of epoxy insulating parts [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [35] DU B X, TIAN M, 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.
- [36] DU Boxue, MA Tingting, SU Jingang, et al. Effects of temperature gradient on electrical tree growth and partial discharge in Silicone rubber under AC voltage[J]. IEEE Access, 2020, (8): 54009-54018.
- [37] CHEN X, WANG X, WU K, et al. Effect of voltage reversal on space charge and transient field in LDPE films under temperature gradient[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 140-149.
- [38] 张灵, 陈健宁, 周远翔, 等. 聚合物绝缘空间电荷动力学的理论模型与数值仿真研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 3037-3054.
- ZHANG Ling, CHEN Jianning, ZHOU Yuanxiang, et al. Progress on theoretical models and numerical simulation of space charge kinetics in polymeric insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 3037-3054.
- [39] GUO P X, LI J, ZHANG C, et al. Effects of mechanical stress on cohesive energy and energy level distribution of bisphenol-A epoxy resin[C]//2021 International Conference on Advanced Electrical Equipment and Reliable Operation. China: IEEE, 2021: 1-4.
- [40] 迟晓红, 高俊国, 郑杰, 等. 聚丙烯中电树枝生长机理研究[J]. 物理学报, 2014, 63(17): 298-305.
- CHI Xiaohong, GAO Junguo, ZHENG Jie, et al. The mechanism of electrical treeing propagation in polypropylene[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(17): 298-305.
- [41] XIE ZI, PANG X, XU T L, et al. Space charge dynamics of epoxy/micro- Al_2O_3 composites under multi-physical fields [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2023, 56(34): 4005.

- [42] 李 雪. 碳硼烷桥连噻吩和三芳基硼系列化合物结构和二阶非线性光学性质的DFT计算[D]. 长春: 东北师范大学, 2012.
- LI Xue. The DFT study on structure and nonlinear optical properties of compounds involving carborane with thiophen and triarylboranes[D]. Changchun: North China Electric Power University, 2012.
- [43] 王 灿, 王有元, 凡 朋, 等. 拉伸状态下LDPE/SiO₂改性材料的空间电荷特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 1163-1170.
- WANG Can, WANG Youyuan, FAN Peng, et al. Study on space charge behavior in LDPE/SiO₂ nanocomposites under tensile condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 1163-1170.
- [44] 杨毅伟, 柳 松, 彭嘉康, 等. 拉伸状态下硅橡胶/交联聚乙烯双层介质界面的空间电荷特性[J]. 绝缘材料, 2014, 47(5): 106-109.
- YANG Yiwei, LIU Song, PENG Jiakang, et al. Space charge characteristics of cross-linked polyethylene and Silicone rubber interface under different tensile rate[J]. Insulating Materials, 2014, 47(5): 106-109.
- [45] DU Boxue, ZHANG Wenjin, LIANG Hucheng. Combined effects of electrical and mechanical stresses on insulation breakdown - part I: Tree growth of epoxy resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(5): 2362-2369.
- [46] 杜伯学, 苏金刚, 徐 航, 等. 机械应力下高温硫化硅橡胶电树枝生长特性[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6627-6634.
- DU Boxue, SU Jingang, XU Hang, et al. Treeing growth characteristics in HTV Silicone rubber considering mechanical stress[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6627-6634.
- [47] LIU Hechen, ZHANG Mingjia, LIU Yunpeng, et al. Growth and partial discharge characteristics of DC electrical trees in cross-linked polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(6): 1965-1972.
- [48] AL-GHAMDI S A, VARLOW B R. Treeing in mechanically prestressed electrical insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(1): 130-135.
- 张 莹(1996—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为环氧树脂绝缘材料劣化与抑制机理。
- 宋慧欣(1981—), 女, 学士, 副教授, 研究方向为高压电器设备绝缘试验技术(通信作者)(E-mail: 13933278667@163.com)。
- 孔晓晓(1993—), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为环氧树脂绝缘材料、高压干式套管与GIS拉杆绝缘设计。
- 杜伯学(1961—), 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为聚合物绝缘材料的可靠性和安全性理论与试验、高温超导电介质、纳米复合绝缘材料、电气绝缘在线监测、高电压新技术等。