第 50 卷 第 1 期：359-369 高电压技术 Vol.50, No.1: 359-369
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20222005

GIL 支柱绝缘子嵌件-环氧界面缺陷演化过程与放电脆裂机制

刘智鹏[1]，魏　来[1]，李庆民[1]，薛乃凡[1]，胡　琦[2]
（1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室，北京 102206；2. 江西省电力有限公司，南昌 330000）

摘　要：交流 GIS/GIL 支柱绝缘子在生产、运行过程中其金属嵌件-环氧界面容易引入气隙缺陷，被认为是导致支柱绝缘子炸裂击穿故障的重要诱因。通过设计带有气隙缺陷的支柱绝缘子并搭建炸裂模拟实验平台，研究了绝缘子嵌件-环氧界面缺陷演化与炸裂过程。基于实验研究结果，将支柱绝缘子炸裂过程分为 3 个特征阶段：裂纹产生与扩展阶段、断裂阶段、炸裂阶段，气隙缺陷引发的局部放电会诱导裂纹的产生与劣化扩展，导致绝缘子在极短的时间内快速断裂并在多次高能电弧冲击下炸裂，呈现脆性断裂的特征。同时，通过实验分析了影响支柱绝缘子炸裂的关键因素，直流电压下绝缘子的炸裂概率比交流电压低 10%~20%。进一步构建了电-机械耦合作用下的裂纹扩展相场仿真模型，分析了支柱绝缘子不同炸裂阶段的主导机制。在裂纹的产生与扩展阶段，电势能起到主要作用；在断裂阶段，电势能的作用逐渐减弱，机械势能逐渐增大并起到主导作用，当机械势能达到材料应力临界点时，绝缘子发生脆性炸裂。该研究成果初步揭示了支柱绝缘子气隙缺陷引发的放电脆裂机制，为支柱绝缘子的故障分析及优化设计提供理论基础。

关键词：支柱绝缘子；放电脆裂；界面缺陷；缺陷演化；相场仿真

Defects Evolution Process and Mechanism of Discharge Embrittlement of GIL Post Insulator Inserts and Epoxy Interface

LIU Zhipeng[1], WEI Lai[1], LI Qingmin[1], XUE Naifan[1], HU Qi[2]
(1. State Key Lab of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330000, China)

Abstract: The metal insert-epoxy interface of AC GIS/GIL post insulators is prone to introduce air gap defects during the production and operation process, which is considered as an important incentive of the cracknels and breakdown failure of post insulators. By designing a post insulator with air gap defects and establishing a cracking simulation platform, the defect evolution and cracking process of insulator insert-epoxy interface were studied. The research results show that the cracking process is mainly divided into three stages, namely, the stage of crack generation and propagation, the stage of cracking, and the stage of explosion. The partial discharge caused by the air gap defect will induce the generation and deterioration of the crack, resulting in the rapid fracture of the insulator in a very short time and the cracking of the insulator under the impact of multiple high-energy arcs, showing the characteristics of brittle cracking. At the same time, the key factors affecting the bursting of pillar insulators are analyzed through experiments. The bursting probability of insulators under AC voltage is 10%~20% higher than that under DC voltage. Furthermore, the phase field simulation model of crack propagation under the action of electro-mechanical coupling was further constructed, and the dominant mechanism of different burst stages of the pillar insulator was analyzed. In the crack generation and propagation stage, the electric potential energy plays the main role; In the cracking stage, the effect of electric potential energy gradually weakens, and the mechanical potential energy gradually increases and plays a leading role. When the mechanical potential energy reaches the critical point of material stress, the insulator will crack brittlely. Electric potential energy plays an important role in the initiation and propagation of cracknels. In the cracking stage, the effect of electric potential energy is gradually weakened, and the mechanical potential energy gradually increases and plays a leading role. When the mechanical potential energy reaches the critical point of material stress, the insulator explodes. The research results of this paper preliminarily reveal

基金资助项目：国家自然科学基金(51737005；52127812；51929701)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51737005, 52127812, 51929701).

the discharge embrittlement mechanism caused by the air gap defect of the pillar insulator and provide a theoretical basis for the fault analysis and optimal design of the pillar insulator.

Key words: post insulators; discharge embrittlement; interface defects; defects evolution; phase field simulation

0 引言

支柱绝缘子广泛应用于超/特高压气体绝缘金属封闭输电线路(gas insulated metal enclosed transmission line, GIL)中，起到支撑导体和电气绝缘的作用，具有提供热膨胀和机械应变补偿等方面的优势，是 GIL 基础单元中常用的关键部件。然而，近年来支柱绝缘子炸裂事故频发，严重威胁着电网的安全运行[1-3]。

由于支柱绝缘子环氧基体与金属嵌件的力学、电学性能有着显著差异，金属嵌件-环氧界面处电场，力场分布不均。在 GIL 生产、装配、运输阶段的机械碰撞、振动及运行的过程中，该界面受到电-热-力多场耦合应力的影响，界面处易产生毛刺、气隙等微小缺陷。王井飞等学者基于多起绝缘子炸裂故障的局放数据分析，认为嵌件-环氧界面缺陷是绝缘子炸裂的根本原因[4-5]。黎卫国等学者对有界面缺陷的三支柱绝缘子进行了研究，发现对绝缘子开展雷电冲击试验后，有气隙缺陷的三支柱绝缘子会在支腿处炸裂[6]。但目前针对绝缘子炸裂的研究主要集中于炸裂后的故障分析，研究人员仅对其宏观炸裂现象进行了分析，并未对界面缺陷的演化过程以及炸裂产生机制形成共识。因此有必要对界面缺陷的演化行为及对炸裂的影响机制进行深入分析。

针对绝缘子界面处缺陷演化的研究，刘鹏等学者对气隙直径为 1~3 mm，高度为 0.05~0.3 mm 的电场进行了仿真研究，结果表明支柱绝缘子金属嵌件与绝缘材料之间气隙缺陷直径越短，气隙处的电场畸变值越高[7]。吴泽华等学者使用棒-板电极研究了环氧树脂内部存在缝隙时的裂纹损伤演化过程[8]，表明环氧树脂初始裂纹从其内部缝隙位置处开始形成。Ibrahim Iddrissu 等学者使用针-板电极研究了不同电压波形下环氧树脂的电树枝生长过程，表明交流电压会在裂纹生长过程中起到驱动作用[9]。

事实上，GIL 金属嵌件-环氧界面不仅受到电应力还受到复杂的机械应力的影响。陈允等学者通过实验发现，当支柱绝缘子受到机械应力时，嵌件附近会最先产生裂纹，是绝缘子的薄弱环节[10]。王闯等学者也通过水压实验发现界面处的切应力会使盆式绝缘子与中心导体界面出现剥离[11]。崔博源等学者表明在嵌件处设计应力缓释槽对绝缘子炸裂有显著的抑制作用[12]。机械应力对绝缘子的裂纹扩展起到重要的作用，然而目前研究人员多是通过型式试验检测绝缘子界面处的机械强度，对于机械应力在绝缘子炸裂过程中起到的作用仍缺乏深入研究。

绝缘子炸裂是从裂纹的形成开始的，相场仿真通过一系列的微分方程描述断裂时的物理过程，从而避免了繁琐的裂纹面追踪，在模拟裂纹的起裂、传播等现象中表现出了一定的优势[13]。近年来，研究人员逐渐将相场仿真应用到聚合物材料中电树枝的产生和传播当中[14-15]。支柱绝缘子在运行过程中受到电-机械的耦合作用，因此需建立电-机械耦合作用下的相场仿真模型来研究支柱绝缘子的炸裂机制。由于相场模拟系统的自由能泛函中，可考虑不同外场作用下的能量方程和动力学方程，从而获得绝缘材料在不同外场作用下的劣化与损坏过程。因此，相场模型可模拟绝缘子在电场-机械力场的耦合应力作用下的裂纹扩展，可以从介观尺度探究绝缘子炸裂机制。

因此，本文通过设计具有界面气隙缺陷的支柱绝缘子，搭建可观测的支柱绝缘子炸裂模拟实验平台，获得金属嵌件-环氧界面气隙缺陷演化过程，通过相场仿真考察畸变电场与机械应力失衡对支柱绝缘子炸裂的影响，以期揭示气隙缺陷下 GIL 支柱绝缘子的炸裂机制，为支柱绝缘子的绝缘设计和风险评估提供基础依据。

1 实验平台与实验方法

为实验采用的支柱绝缘子模型如图 1 所示，由环氧树脂基体、金属嵌件及铝电极组成。环氧树脂基体为直径 20 mm、高为 20 mm 的圆柱；金属嵌件为直径 10 mm、高为 5 mm 的圆台形铝块；铝电极为直径 24 mm、高 2 mm 的圆盘，嵌件和电极均经过抛光处理以减小表面微放电的产生。在制作绝缘子时，将双酚 A 型环氧树脂、固化剂和促进剂混合搅拌均匀并进行真空脱气处理，然后倒入装有金属嵌件的不锈钢模具中，通过阶梯升温固化[16]。环氧树脂与环氧/氧化铝复合材料在受到机械-电耦合应

力作用下的裂纹扩展与断裂模式相似[17-18]。同时由于环氧树脂本身透光率较高，在 SF_6 中可以观测到环氧树脂的内部放电，因此一方面在长期加压过程中可以用灵敏度较高的光电倍增管采集其放电信号；另一方面可以从宏观上观察其是否有裂纹发展，便于开展大量实验并准确获取绝缘子脆裂时的运动和放电规律。绝缘子固化完成后，在位置 A 处钻孔至绝缘子嵌件-环氧界面处，然后用砂纸进行打磨并用丙酮擦拭干净，待晾干后在小孔处填满环氧树脂并向嵌件-环氧界面注入微量空气，通过控制进气量的多少来控制气息缺陷的大小，再次进行固化形成气隙缺陷。

气隙位于金属嵌件与环氧树脂的交界处，呈半圆型，通过控制注入气体量控制气隙大小，实际绝缘子嵌件-环氧界面的气隙缺陷多为扁平状结构，采用 X 光探伤技术发现其呈现扁平的椭圆状[19]，如图 2 所示。文献研究表明：电场方向垂直的气隙缺陷面积大小对起始放电电压起主导作用，而气隙缺陷高度的影响较小[20]。

本文中选取了横截面积与扁平椭圆状非常近似的半圆型气隙缺陷，直径分别为 1、1.5、2、2.5 mm，这充分考虑了气隙缺陷面积对起始放电电压的影响，在缺陷面积大小和放电特性方面与实际缺陷具有一定的等价性。

为了模拟支柱绝缘子承受的多场耦合应力，搭建了如图 3 所示的支柱绝缘子炸裂模拟实验平台，主要包括 GIL 实验腔体、高压电源、高速相机、光电倍增管、实验电极。高压电源经高压套管引入腔体内部并向电极施加交/直流电压，实验电极经铝制导杆连接环扣部件与 GIL 中心导体相连，嵌件底部安装方型铝制基座，用导电银胶固定在腔体内壁，以保证绝缘子与电极之间紧密连接。高速相机(Faster HiSpec5)用于拍摄绝缘子的动态炸裂过程，光电倍增管(HAMAMATSU Photosensor Module)用于检测绝缘子缺陷演化过程中的放电信号。

图 4 所示为基于有限元仿真获得的支柱绝缘子的电场分布，电压设置为 60 kV，计算所得的最大电场强度为 5.03 kV/mm，电场不均匀度为 1.67，这与实际运行支柱绝缘子不均匀系数相近[21]。此外，支柱绝缘子运行过程中还会受到导杆和绝缘子的重力，热膨胀导致的拔插力等机械应力[22]。为此，采用油浴循环加热的方式对高压电极加载了 60 ℃的温度，模拟热膨胀所带来的拔插力的影响。

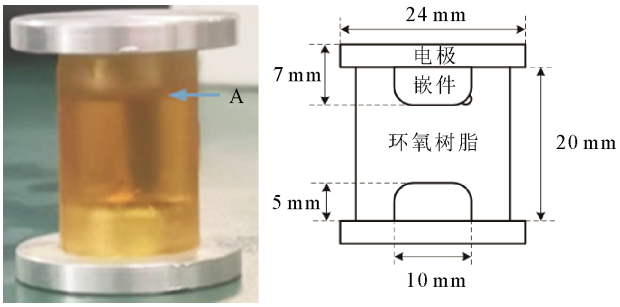


图 1　支柱绝缘子样品设置

Fig.1　Post insulator sample setup

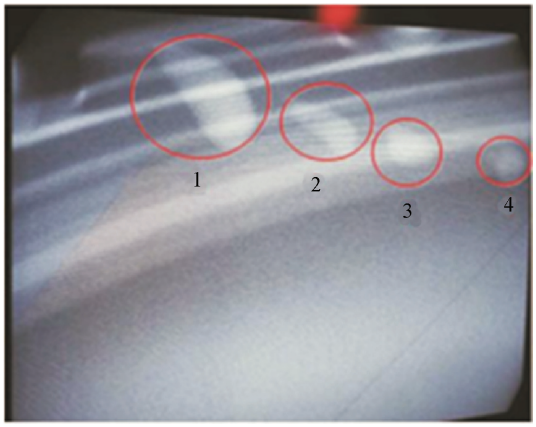


图 2　绝缘子气隙缺陷实际分布与形貌

Fig.2　Actual distribution and morphology of insulator air gap defects

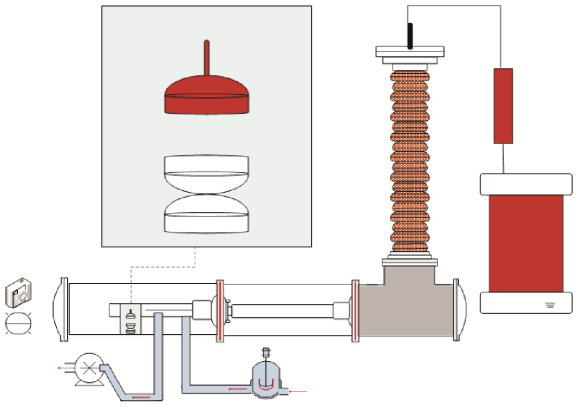


图 3　支柱绝缘子炸裂模拟实验平台

Fig.3　Experimental platform and device

实验前，首先用无水乙醇擦洗绝缘子与实验腔体；随后密封腔体，抽真空后充入 0.5 MPa 的 SF_6 气体。实验时，以 5 kV/s 的升压速度快速将电压升至 60 kV，然后采用分级加压方法，每级加压幅度为 10 kV，加压时长为 2 h，直至发生放电，实验加压方法如图 5 所示。在进行实验的过程中，不同气

隙缺陷的绝缘子样本个数均为 20，一半用于直流下的炸裂模拟实验，另一半用于交流下的炸裂模拟实验，统计在不同情况下炸裂绝缘子占总实验绝缘子的比例，并将在不同情况下炸裂绝缘子占总实验绝缘子的比例定义为绝缘子的炸裂概率。本文实验中未考虑电流对炸裂所造成的影响。

2 支柱绝缘子炸裂典型特征及影响因素

2.1 支柱绝缘子动态炸裂过程

采用气隙大小为 1、1.5、2、2.5 mm 的绝缘子开展炸裂模拟实验。为了更好的描述绝缘子的炸裂现象，将绝缘子炸裂时的电压称作绝缘子的炸裂电压，实验发现在快速升压至 SF_6 气隙击穿电压后，绝缘子不会立即炸裂，而是在加压一段时间后才发生炸裂，通过高速相机观察绝缘子的动态炸裂过程，如图 6 所示。

本文实验中交/直流下绝缘子的炸裂特征与炸裂动态过程相似,并将其归纳如下：1) 绝缘子的炸裂为脆性断裂，即绝缘子断裂前没有表现出明显的变形而发生断裂。绝缘子断裂阶段为瞬态过程，电弧从出现到绝缘子炸裂在 1 s 内即可完成。绝缘子炸裂位置均通过其气隙缺陷处，绝缘子炸裂不是由一次电弧冲击所造成的，而是缘于体击穿和沿面闪络的多次冲击。2) 绝缘子炸裂具有一定阈值。电压在 70 kV 以下时，无论是延长加压时间，还是改变加压类型，绝缘子均不会发生炸裂。

图 6 给出了 100 kV 直流电压下绝缘子击穿炸裂的动态过程，本文根据实验现象将绝缘子动态炸裂过程分为 3 个阶段：裂纹产生与扩展阶段、断裂阶段、炸裂阶段。图 6 (a)表示的是绝缘子的裂纹产生与扩展阶段，这一阶段所占时间长且无法用高速相机直接观测，可以看到，绝缘子在这一阶段没有宏观上的变化出现，但此时光电倍增管可以测量到间歇性的放电信号。图 7 为 100 kV 直流电压下的测量结果，这表明局部放电一直存在，其所产生的高能粒子不断轰击绝缘子对其造成损伤。

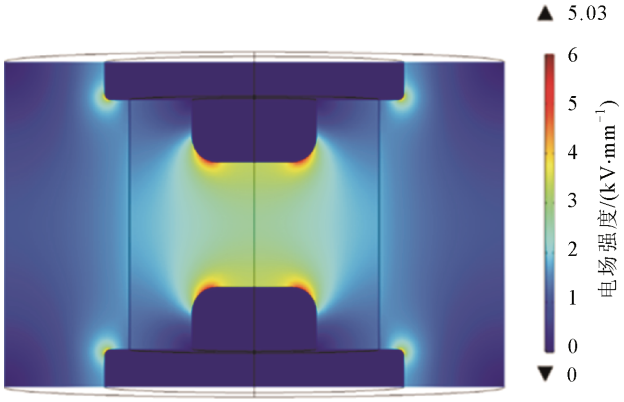


图 4 支柱绝缘子电场分布

Fig.4 Electric field distribution of post insulator

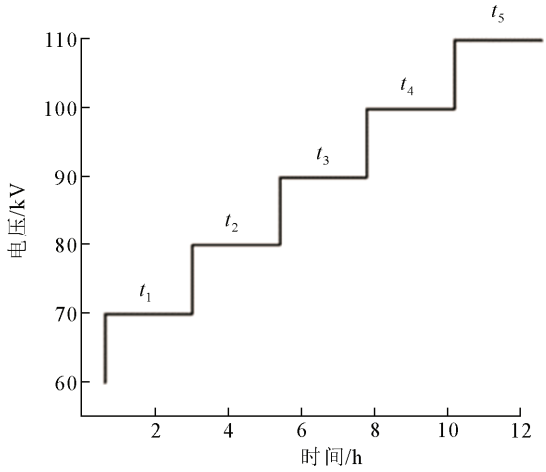
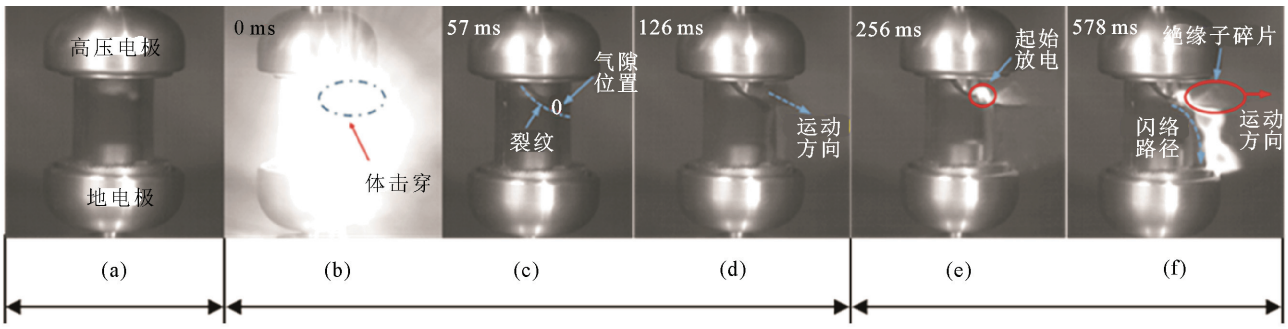


图 5 实验加压方法

Fig.5 Experimental pressure method



(a) 裂纹产生与扩展阶段 (b)—(d) 断裂阶段 (e)—(f) 炸裂阶段

图 6 绝缘子炸裂动态过程

Fig.6 Dynamic process of insulator burst

由图 6(b)可以看出，随着加压时间的增加，绝缘子存在气隙缺陷的一侧发生放电，产生明亮的电弧，将电弧出现的时刻定义为炸裂的初始时刻。放电结束后，由图 6(c)可以观察到，绝缘子缺陷侧出现了一条肉眼可见的黑色裂隙，此裂隙通过气隙缺陷位置处，并且没有看到可视的断开点，因此，将图 6(b)—6(d)定义绝缘子为断裂阶段。从图 6(d)可以看出，绝缘子出现裂隙后，由于电场和机械力场的作用，断裂部分的绝缘子无法保持其原有状态，在 126 ms 时，绝缘子碎片开始从绝缘子基体脱落，从绝缘子的脱落方向来看，绝缘子受到水平向右的冲击力。

至 256 ms 时刻，断裂后的绝缘子高压嵌件有电弧产生，正如图 6(e)所示，从高速相机拍摄的电弧来看，绝缘子低电位嵌件处与断裂之后的裂隙之间发生了沿面闪络，对绝缘子造成了二次冲击。578 ms 时刻可以看到放电释放的大量能量导致绝缘子碎片从电弧处冲出，绝缘子碎片与绝缘子基体分离，图 6(e)—6(f)定义为绝缘子的炸裂阶段。此后，绝缘子碎片成为新的放电点，电弧随着炸裂的绝缘子碎片一同向外移动，逐渐离开环氧树脂基体，绝缘子炸裂过程结束。

2.2　支柱绝缘子炸裂的关键影响因素

本文重点研究了电压大小、加压时间、电压类型、气隙大小等 4 种因素对绝缘子炸裂的影响。表 1 为绝缘子炸裂概率，由表 1 可知，实验中炸裂的绝缘子占总实验绝缘子的 60%。直流电压下绝缘子的炸裂概率比交流电压下绝缘子的炸裂概率低 10%~20%。气隙为 2.5 mm 的绝缘子炸裂概率最高，气隙为 1 mm 与 1.5 mm 的绝缘子炸裂概率相差不大，总体而言，炸裂概率随着气隙直径的增加而增大。

图 8 为不同气隙缺陷的绝缘子在不同加压时间下的炸裂概率，从图 7 可以看出，在加压的 t_1~t_2 阶段绝缘子不会发生炸裂，绝缘子炸裂时间分布在 t_3~t_5 之间，对于缺陷为 1 mm 的绝缘子，t_3~t_5 内发生炸裂的概率大致相同。而对于 1.5 mm 与 2 mm 的绝缘子来说，炸裂的概率随着时间的增加而增加，对于 2 mm 的绝缘子，当电压升高到 100 kV 时，绝缘子基本上完成炸裂。t_5 阶段的电压为 110 kV，2 mm 的绝缘子在 t_5 时间段之前均炸裂。

为了更好地描述不同电压类型对绝缘子炸裂的影响，对气隙大小为 1 mm 的绝缘子在其炸裂电压下长期加压，图 9 为绝缘子在不同电压等级下的耐压时间。实验结果表明，在 70~90 kV 的电压范围，随着电压的升高，交/直流电压下的绝缘子耐压时间均出现大幅度的减少，基本上呈线性降低；在 100~110 kV 的电压范围，绝缘子耐受时长随电压变化不大，电压升高对绝缘子耐受时长的影响逐渐减弱。在相同电压下，直流电压下绝缘子的耐受时长均高于交流电压下绝缘子的耐受时长。

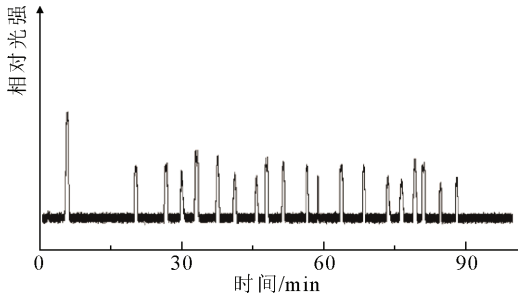


图 7　裂纹产生与扩展阶段放电信号

Fig.7　Discharge signal at crack generation and propagation stage

表 1　绝缘子炸裂概率

Table 1　Probability of insulator bursting

气隙大小/mm	DC 炸裂概率/%	AC 炸裂概率/%	总炸裂概率/%
1	30	20	40
1.5	40	40	60
2	40	60	50
2.5	60	70	65

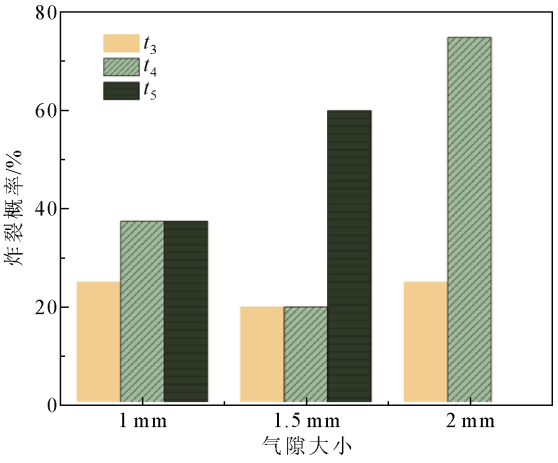


图 8　绝缘子在不同加压时间下的炸裂概率

Fig.8　Explosion probability of insulators at different pressurization times

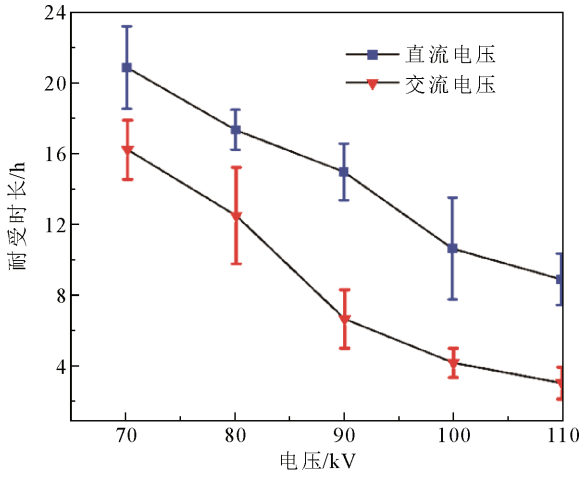


图 9 交/直流电压下绝缘子耐受时长随电压变化情况

Fig.9 Variation of insulator withstand time with voltage under AC/DC voltage

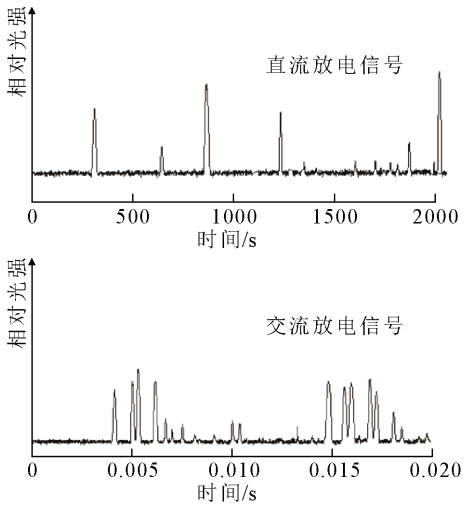


图 10 交/直流电压下放电信号

Fig.10 AC/DC voltage discharge electrical signal

3 支柱绝缘子炸裂机制分析

3.1 初始裂纹的产生

绝缘子的炸裂行为与初始裂纹的产生和发展密切相关，以气隙缺陷 1 mm 的绝缘子为例，图 10 为交/直流电压下裂纹产生与扩展阶段光电倍增管测量的光强信号的变化情况。PMT 信号在不同电压类型下有不同的放电形式，局部放电对材料的破坏，这引发了初始裂纹的形成。可以看到，PMT 信号在长期发展的过程中，交流电压下放电信号表现出间隔时间短且数量密集的特点，其每次放电的时间间隔在微秒级别。与交流电压相反，直流电压下放电信号表现出幅值高，间隔时间不确定且数量稀疏的特点，其每次放电的时间间隔较长，一般在几分钟至十几分钟之间。

在直流电压下，来自空间的同极性电荷向下方运动，最终积聚到气隙和环氧树脂基体附近，在此范围内积聚了一定数量的空间电荷，随着电荷输运过程和聚合物链的变化，光子被释放出来，热电荷通过这种方式间歇性的注射到基体中，切断分子链，产生裂纹，如图 11 所示。此外，机械应力和聚合物分子的持续冲击电离作用削弱了环氧树脂的材料性能。针对 LDPE 的研究表明[23]，在裂纹前方会产生预通道结构。当预通道或空洞发展到一定程度时，预通道和聚合物基体之间的结构被分解，导致直流电压下裂纹的产生。直流放电呈现间隔时间不确定且数量稀疏的特点，其放电产生的破坏小，初始裂纹产生与发展困难，绝缘子炸裂概率低。

在交流电压下，当电压极性反转时，气隙中初始电子主要来源于固体绝缘界面上的表面电荷脱陷。当外施交流电压极性反转时，表面电荷会脱陷产生初始电子，且空间电场大大加强了气隙内部电场，因此随着负半周外施电压的逐渐上升，气隙内部的电场越来越强，那些发射的和没有被俘获的电子在电场作用下被加速，这些高能电子获得足够的能量后撞击环氧树脂，损伤环氧树脂基体。文献[24]表明，交流下的电晕放电与电压波形相关，具有规律性，因此其光信号呈现间隔时间短且数量密集的特点，绝缘子随着电压波形的变换持续受到损伤，这加剧初始裂纹的产生。因此，交流电压下绝缘子的炸裂概率均高于直流下绝缘子的炸裂概率，电压类型通过影响绝缘子初始裂纹的形成而影响了绝缘子炸裂。

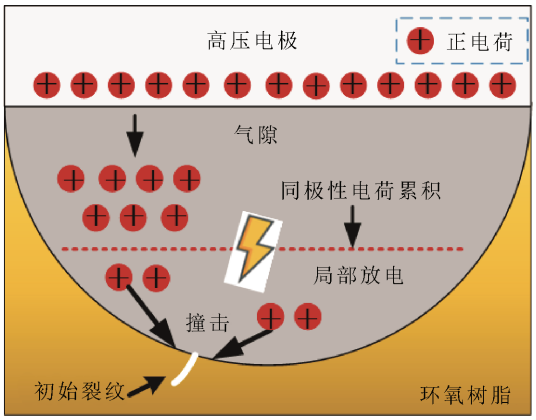


图 11 直流电压下裂纹的产生

Fig.11 Crack generation under DC voltage

对于不同大小的气隙缺陷，气隙内部的电场强

度影响着局部放电的大小，当气隙直径增加时，有效放电面积会增加，初始电子出现的概率增加，气隙中的带电粒子数目增多，这导致更大气隙缺陷中有更多的高能辐射电子轰击绝缘材料，导致绝缘损伤，使得初始裂纹更加容易形成，因此其炸裂概率较高。气隙大小也是通过影响初始裂纹，最终影响了绝缘子的炸裂。

研究人员基于电树枝发展理论对材料的损伤已经进行了深入的分析，目前普遍认为，氧化铝的加入可以抑制电树枝的生长能力[25]。氧化铝在裂纹的形成过程中并未占据主导作用，初始裂纹的产生极大影响着绝缘子的炸裂概率，初始裂纹的产生对绝缘子炸裂产生至关重要的作用，因此，对绝缘子嵌件-环氧界面电场产生影响的电压类型、电压大小、气隙大小等因素均会导致界面处初始裂纹的产生，电场在诱导裂纹产生的过程中起到了至关重要的作用。

3.2　裂纹扩展与断裂的相场仿真

由上述实验观察可知，初始裂纹在一定阶段内形成并逐渐发展，然而由于炸裂的瞬态特征无法通过实验捕捉，因此引入可考虑电-力耦合条件的相场模拟，相场模拟可以模拟介观尺度下的裂纹发展，其在裂纹扩展中已经有了广泛的应用[26-27]，裂纹相场变量的定义如下：

$$\phi(x)=\mathrm{e}^{-|x|/l_0} \tag{1}$$

式中：x 为过渡参数，x=0 与 x=1 分别表示未断裂与断裂的状态；l_0 为长度尺寸参数。裂纹相场模型的演化主要是基于自由能泛函最小化而进行的，裂纹的扩展过程即能量的耗散过程，耗散后的绝大部分能量转化为新裂纹表面的表面能，其优点是任意形式影响裂纹扩展的能量都可以加入到相场模型中。为此，引入裂纹相场仿真研究支柱绝缘子炸裂，在受到电-力耦合作用的绝缘子中，需将电场 $\boldsymbol{E}$、机械力 $\boldsymbol{F}$ 添加到总势能泛函中，此时总势能由应变能 $\psi^{\mathrm{b}}(\varepsilon)$、电势能 $\psi^{\mathrm{e}}(\boldsymbol{E})$、耗散能 $\psi^{\mathrm{d}}(G_{\mathrm{C}})$ 和载荷势能 $W(\boldsymbol{F})$ 所组成，总势能泛函[25]表示为：

$$\Pi=\psi^{\mathrm{b}}(\varepsilon)+\psi^{\mathrm{e}}(\boldsymbol{E})+\psi^{\mathrm{d}}(G_{\mathrm{C}})-W(\boldsymbol{F}) \tag{2}$$

其中，弹性应变能表达式为：

$$\psi^{\mathrm{b}}=\int_{\Omega}g(\phi)\psi^{+}(\varepsilon)+\psi^{-}(\varepsilon)\mathrm{d}\Omega \tag{3}$$

弹性应变能密度函数为：

$$\begin{aligned}\psi^{\pm}(\varepsilon)=&\lambda\langle\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3\rangle_{\pm}/2+\\&\mu(\langle\varepsilon_1\rangle_{\pm}^2+\langle\varepsilon_2\rangle_{\pm}^2+\langle\varepsilon_3\rangle_{\pm}^2)\end{aligned} \tag{4}$$

式中：ε_1、ε_2、ε_3 为应力状态 ε 的 3 个应力主值；μ 和 λ 为拉梅常数；符号$\langle a\rangle_{\pm}$=1/2(a±|a|)，正号表示受拉，负号表示受压。该分解只将拉伸情况下的应变能作为裂纹扩展驱动力。电势能表达式为：

$$\psi^{\mathrm{e}}=\int_{\Omega}h(\phi)W(\boldsymbol{E})\mathrm{d}\Omega \tag{5}$$

$$W(\boldsymbol{E})=\frac{1}{2}\varepsilon_0\boldsymbol{E}^2 \tag{6}$$

式中：ε_0 为真空介电常数；$\boldsymbol{E}$ 是电场强度。耗散能 $\Psi^{\mathrm{d}}(G_{\mathrm{C}})$与材料临界能量释放率 G_{C} 有关，载荷势能 W 与材料的受力有关，$g(\phi)$ 和 $h(\phi)$ 为应力退化函数，计算式如下：

$$g(\phi)=(1-\phi)^2+k \tag{7}$$

$$h(\phi)=(1-\phi)^2+h \tag{8}$$

式中：k 与 h 均为一极小的常数，保证在断裂处机械势能收敛为 0。由 Giffith 理论可知，当总势能泛函的变分为 0 时，总势能泛函取得极值，可以获得应力平衡方程以及在电-机械耦合应力作用下的裂纹相场序参量的演化方程，其表达式如下：

$$\begin{aligned}&G_{\mathrm{c}}l_0\nabla^2\phi-(\frac{G_{\mathrm{c}}}{l_0}+2\psi^{\mathrm{b}}(\varepsilon)+2W(\boldsymbol{E}))\phi=\\&-2(\psi^{\mathrm{b}}(\varepsilon)+W(\boldsymbol{E}))\end{aligned} \tag{9}$$

$$((1-\phi)^2+k)\nabla\sigma_{ij}+b_j=0 \tag{10}$$

式中：第 1 个方程为在电-力耦合下裂纹相场变量$\phi(x)$的演化方程，第 2 个方程为修改后的应力平衡方程，相应的自然边界条件如下：

$$\left((1-\phi)^2+k\right)\boldsymbol{n}_i\sigma_{ij}=h_j \tag{11}$$

$$\nabla\phi\boldsymbol{n}_i=0 \tag{12}$$

式中：h_j 和 b_j 分别为材料所受体力和边界力；σ_{ij} 为弹性应变下所受应力；$\boldsymbol{n}_i$ 为单位向量垂直于裂纹表面的分量。首先建立先建立合适的相场模型，然后在求解域上计算方程(6)，同时保证满足相应的边界条件，即可得到裂纹相场变量$\phi(x)$的分布规律。当计算随时间变化载荷下不同时刻的控制方程，则可得不同时刻裂纹相场变量$\phi(x)$的分布规律，而把这些结果放在一起分析，则可得到裂纹相场变量$\phi(x)$随时间变化的演化规律，从而能描述裂纹的萌生和扩展过程。

本文根据扫描电镜所观察到的图片，将绝缘子气隙及其边缘萌生的微小裂纹简化为图 12 的模型，相场仿真所用环氧树脂材料参数如表 2 所示。由于受到浇注工艺、真空度和温度的影响，环氧树脂在固化过程中会产生大量的残余应力。同时，环氧树

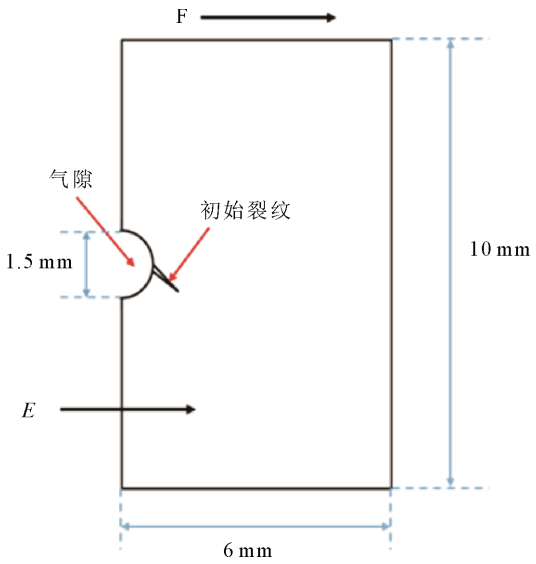


图 12 相场仿真设置

Fig.12 Phase field simulation Settings

表 2 环氧树脂仿真计算所用参数

Table 2 Parameters used in epoxy resin simulation calculation

参数	数值
密度/(kg·m^{-3})	1200
杨氏模量/GPa	3
泊松比	0.32
相对介电常数	3.5
临界能量释放率/(J·m^{-2})	3800

脂固化收缩过程中，可能会导致其内部出现难以检测的微小缺陷，这也会导致环氧树脂内部存在着一定的应力集中。

在相场仿真中，微小裂纹的尖端会产生很大的应力集中，该裂纹尖端处具有很大的应变能密度，从而可以促进新裂纹的产生，关于电场对聚合物临界能量释放率的影响，文献[28]研究表明，临界能量释放率与电势的平方成比例，其关系可用以下计算式来描述：

$$G_{\mathrm{EP}}^{V}=G_{\mathrm{EP}}-bV^{2} \tag{13}$$

式中：G_{EP}^{V}为环氧树脂在电场作用下的临界断裂能量释放率；G_{EP}为环氧树脂的临界断裂能量释放率，其大小可以通过实验获得；b 为常数，大小为 1.27×10^{-7}[29]。利用有限元方法求解相应的相场方程，从而获得裂纹的形成与扩展过程。

裂纹的演化过程如图 13 所示，相场断裂模型通过定义一个取值在区间[0,1]的标量相场近似描述裂纹的分布，当相场取值为 0 时表示材料完好(无裂纹)；相场取值为 1 时表示材料完全破坏(裂纹)；当

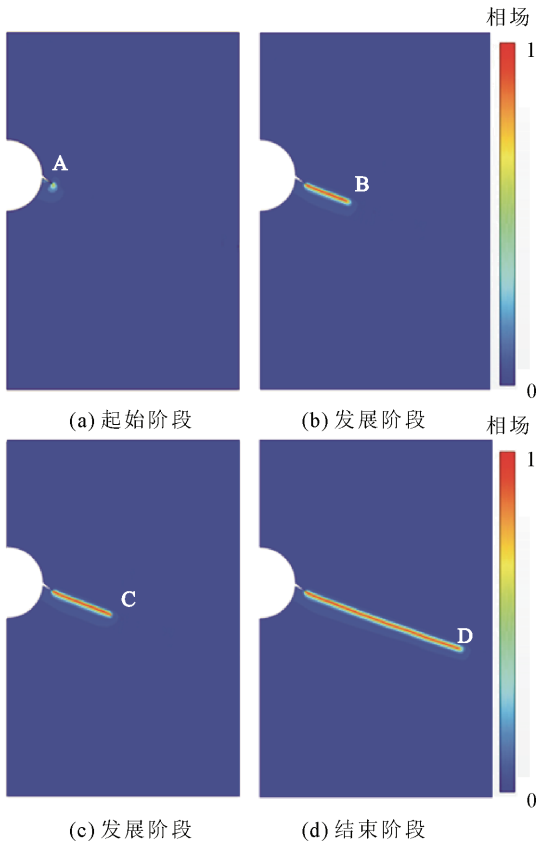


图 13 裂纹演化过程

Fig.13 Evolution of fracture crack

相场取值介于 0~1 时，材料处于完好和完全破坏之间的过渡状态。此处仿真中，颜色代表的为损伤程度，红色为 1 表示完全破坏(裂纹)，蓝色为 0 表示未破坏(无裂纹)。从图 13 (a)可以看出，裂纹从初始裂纹所在的尖端开始扩展，在此阶段，裂纹尖端的损伤在电场的作用下不断累积，经过 10 h 左右，裂纹开始扩展。图 14 表示裂纹扩展过程中裂纹尖端所受机械应力和电场强度的关系，在 AB 之间时，裂纹处的电势能较高，在电场作用下，激活能降低，裂纹起裂的临界断裂能量密度会降低。因此，在此阶段，裂纹扩展主要是依靠电场所带来的电势能。随着裂纹逐渐扩展，裂纹尖端所受到的电势能逐渐降低，此时材料扩展逐渐依靠机械应力所带来的机械能，直至裂纹扩展至 B 处，裂纹扩展出现停滞，此时电势能不再造成裂纹的萌生，BC 为主导作用转变的关键阶段，图 13(b)—13(c)阶段裂纹扩展缓慢。此时材料所受的机械应力不断增加，当裂纹长度扩展到曲线峰值 C 点后，绝缘子此时受到的力最大，为 4.37 kN，在经过此峰值后可以看出此时环氧树脂的承受能力急剧降低，此后裂纹在 0.5 s 内以极快的速度扩展到图 13(c)的位置。为了验证相场模拟

中初始裂纹的产生与初步发展，选取加压 10 h 的绝缘子，对其缺陷处剖面观察，图 15 为裂纹的扫描电镜图。扫描电镜的样品是由支柱绝缘子剖面精密切削而来，可以看到气隙周围环氧树脂材料出现烧蚀并且其边界向外扩展，在损伤最严重的区域，其曲率半径最大，裂纹在此位置产生并开始延伸，初始裂纹在延伸过程中，其两侧也有微小裂纹的产生。进一步观察可以看到，裂纹内部及两侧微小裂纹均存在严重的碳化情况，裂纹扩展路径为一条弧度较小的曲线，该裂纹扩展路径与相场仿真中的裂纹扩展情况基本相符。不过，由于模型中受损网格单元的局部压应力场和残余刚度，裂纹扩展在到达外部边界之前减慢，仿真最后一步的裂纹扩展分布如图 13(d)所示。

相场仿真表明在环氧树脂裂纹扩展的初期，电势能在其中起到了至关重要的作用，也因为如此，影响初始裂纹生成的因素也影响到了绝缘子的炸裂概率。然后，随着裂纹的逐渐扩展，电势能逐渐减小，机械势能逐渐占据主导作用，从实验所得到的环氧树脂的断裂行为来看，环氧树脂断裂属于脆性断裂，对应于仿真中裂纹扩展的 C 到 D 这一阶段，此时电势能影响较小，脆性断裂主要由机械势能来主导完成。

3.3　支柱绝缘子炸裂故障分析

图 16 为现场炸裂的故障绝缘子，现场中支柱绝缘子炸裂现象与本文的研究成果相一致，绝缘子炸裂符合以下基本特征：1）绝缘子断裂为脆性断裂，在现场事故中，支柱绝缘子在炸裂前均没有明显的放电现象，裂纹扩展阶段所用时间长并且这一阶段产生的微弱放电不易被检测；并且绝缘子炸裂在很短的时间内完成。这与本文实验的研究一致，裂纹扩展阶段尽可用灵敏度较高的光电倍增管检测，绝缘子炸裂过程仅为 0.5 ms。2）绝缘子炸裂发生于其金属嵌件-环氧界面，图 16(a)和 16(b)分别为炸裂事故之后的金属嵌件与绝缘子，可以看到，金属嵌件处烧蚀严重，并且解体后的绝缘子内部烧至焦黑，说明断裂阶段有着体击穿的参与。这与实验中图 6(e)—6(f)的断裂阶段相一致。3）图 16(c)可以看到支柱绝缘子炸裂后其表面有放电痕迹，这表明在绝缘子炸裂时伴随着沿面闪络，正如实验中所述图 6(e)—6(f)的绝缘子炸裂阶段，此阶段放电位于断裂后的裂隙处绝缘子表面。可以看出，实际绝缘子炸裂的阶段性特征与文中实验绝缘子炸裂特征相一致。

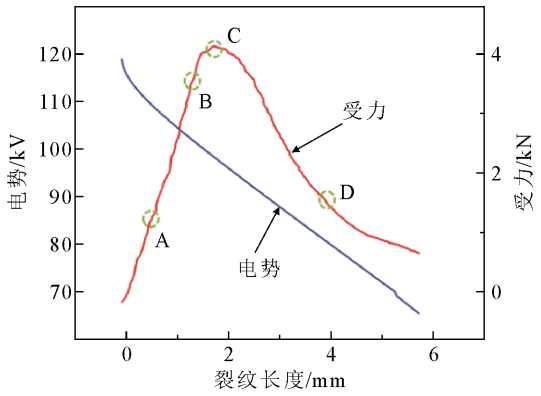


图 14　裂纹扩展过程中的裂纹尖端电势与机械应力

Fig.14　Potential and force during crack propagation

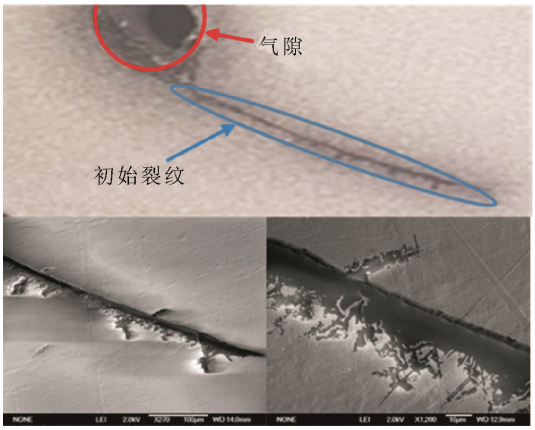
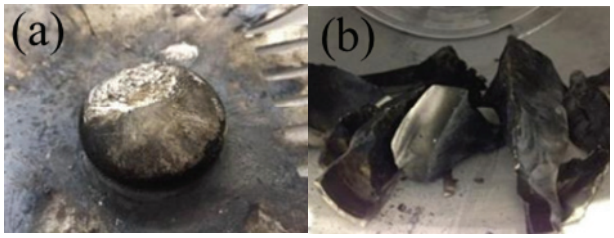


图 15　裂纹的扫描电镜图像

Fig.15　SEM image of initial crack



(a) 炸裂事故后的金属嵌件　(b) 炸裂事故后的绝缘子碎片



(c) 支柱绝缘子炸裂表面放电痕迹

图 16　支柱绝缘子炸裂典型故障

Fig.16　Typical faults of post insulator bursting

4 结论

1）实验观测了支柱绝缘子气隙缺陷演化与炸裂过程，界定了炸裂过程的 3 个发展阶段：裂纹产生与扩展阶段、断裂阶段、炸裂阶段。发现气隙缺陷引发的局部放电会诱导裂纹的产生与劣化扩展，导致绝缘子在极短的时间内快速断裂并在多次高能电弧冲击下炸裂。

2）支柱绝缘子的炸裂过程容易受到电压类型、缺陷尺寸等因素的影响。相较于交流，直流下气隙缺陷引发的放电频次低，对绝缘材料的放电损伤小，因此绝缘子的炸裂电压更高；直流电压下绝缘子的炸裂概率比交流下的低 10%~20%；随气隙缺陷尺寸的增大，绝缘子的炸裂概率更大。

3）基于裂纹相场仿真揭示了支柱绝缘子不同炸裂阶段的主导机制。电势能诱发了初始裂纹的产生，但会在裂纹扩展过程中逐渐减小，机械势能在裂纹扩展过程中逐渐增大并起到主导作用。当机械势能达到材料应力临界点时，绝缘子发生脆性炸裂。

参考文献 References

[1] 李 静，吕 杰，沈恒毅，等. 核电厂气体绝缘金属封闭输电线路故障原因分析及解决措施[J]. 电力与能源，2015，36(6)：876-879.
LI Jing, LÜ Jie, SHEN Hengyi, et al. Fault analysis and solutions for gas insulated Metal-Enclosed transmission Line in nuclear power plant[J]. Power & Energy, 2015, 36(6): 876-879.

[2] 黎卫国，张长虹，杨 旭，等. 500 kV GIL 三支柱绝缘子炸裂故障分析与防范措施[J]. 电瓷避雷器，2019(3)：221-227.
LI Weiguo, ZHANG Changhong, YANG Xu, et al. Analysis and protecting measures on burst fault of three-pillar insulator of 500 kV GIL[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(3): 221-227.

[3] 郑 尧，郝艳捧，王国利，等. GIL 三支柱绝缘子机械应力超声检测技术[J]. 高电压技术，2021，47(6)：2022-2032.
ZHENG Yao, HAO Yanpeng, WANG Guoli, et al. Ultrasonic detecting technology of mechanical stress in GIL three-post insulators[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2022-2032.

[4] 王 健，平 安，刘人郢，等. 直流电压下绝缘子附近纤维的吸附运动行为及其对表面电荷积聚的影响[J]. 高电压技术，2022，48(12)：4697-4706.
WANG Jian, PING An, LIU Renying, et al. Adsorption motion behavior of fibers near insulators under DC voltage and its influence on surface charge accumulation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4697-4706.

[5] 吴泽华，龚 傲，王浩然，等. GIL 绝缘子用环氧复合材料固化形变的试验研究与仿真模拟[J]. 高电压技术，2021，47(10)：3590-3599.
WU Zehua, GONG Ao, WANG Haoran, et al. Experimental and simulation study on cure-induced distortion of epoxy composite used in GIL insulators[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3590-3599.

[6] 黎卫国，张长虹，杨 旭，等. GIL 设备三支柱绝缘子界面气隙局放诊断与出厂检测分析[J]. 高压电器，2020，56(8)：224-229.
LI Weiguo, ZHANG Changhong, YANG Xu, et al. Diagnosis and routine test analysis of air gap partial discharge at the interface of the three-pillar insulator in the GIL[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 224-229.

[7] 刘 鹏，吴泽华，朱思佳，等. 缺陷对交流 1100kV GIL 三支柱绝缘子电场分布影响的仿真[J]. 电工技术学报，2022，37(2)：469-478.
LIU Peng, WU Zehua, ZHU Sijia, et al. Simulation on electric field distribution of 1100kV AC tri-post insulator influenced by defects[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 469-478.

[8] WU Z H, TIAN H D, ZHU S J, et al. In-situ observation of electrical tree evolution in epoxy dielectrics with internal cracks[J]. High Voltage, 2021, 6(2): 210-218.

[9] IDDRISSU I, ROWLAND S M, ZHENG H L, 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.

[10] 陈 允，于 洋，崔博源，等. 1100 kV 盆式绝缘子界面处理工艺及质量管控措施[J]. 绝缘材料，2015，48(5)：44-49.
CHEN Yun, YU Yang, CUI Boyuan, et al. Study of interface treatment process and quality control measures for 1100 kV basin-type insulator[J]. Insulating Materials, 2015, 48(5): 44-49.

[11] 王 闯，贾 静，赵 朗，等. 特高压 1100 kV GIS 盆式绝缘子中心导体与绝缘盆体之间界面应力形成和作用过程讨论[J]. 西安理工大学学报，2019，35(2)：155-162.
WANG Chuang, JIA Jing, ZHAO Lang, et al. Discussion on the formation and action process of interfacial stress between the center conductor and the insulation material of the UHV spacer used in 1100kV GIL[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2019, 35(2): 155-162.

[12] 陈 允，崔博源，王宁华，等. 1100 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 1100 kV GIS[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2): 564-570.

[13] 张子瑜，郝 林. 扩展有限元法在断裂力学相场模型中的应用[J]. 航空学报，2022，43(9)：225976.
ZHANG Ziyu, HAO Lin. Application of X-FEM in a phase-field model for crack propagation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(9): 225976.

[14] SHEN Z H, WANG J J, JIANG J Y, et al. Phase-field modeling and machine learning of electric-thermal-mechanical breakdown of polymer-based dielectrics[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1843.

[15] ZHU M X, LI J C, SONG H G, et al. A phase field model for the propagation of electrical tree in nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(2): 336-342.

[16] 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.

[17] 王 旗，李 喆，尹 毅，等. 微/纳米氧化铝/环氧树脂复合材料抑制电树枝生长能力的研究[J]. 电工技术学报，2015，30(6)：255-260.
WANG Qi, LI Zhe, YIN Yi, et al. The effect of micro and Nano alumina on the ability of impedance on the electrical tree of epoxy resin[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 255-260.

[18] 虞锦洪. 高导热聚合物基复合材料的制备与性能研究[D]. 上海：上海交通大学，2012.

YU Jinhong. Study on preparation and properties of polymer-based composites with high thermal conductivities[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2012.

[19] 邵先军，詹江杨，常丁戈，等. 550 kV GIS 盆式绝缘子多气泡放电的测试与诊断[J]. 高电压技术，2020，46(2)：554-560.
SHAO Xianjun, ZHAN Jiangyang, CHANG Dingge, et al. Test and diagnosis of multiple voids discharge for 550 kV GIS insulation spacer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 554-560.

[20] 潘　浩，殷庆铎，高文胜. 固体绝缘中气隙尺寸对局部放电过程的影响[J]. 高电压技术，2008，34(3)：458-461.
PAN Hao, YIN Qingduo, GAO Wensheng. Influence of void dimensions on partial discharge in solid insulation[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 458-461.

[21] 黄哲恒，梅红伟，高　超，等. 变压器套管电场强垂直分量对操作冲击放电特性的影响[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2838-2845.
HUANG Zheheng, MEI Hongwei, GAO Chao, et al. Effect of strong vertical components of electric field in transformer bushing on switching impulse discharge characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2838-2845.

[22] 陈　允，崔博源，黄常元，等. 特高压 GIL 用绝缘子材料寿命试验及预测[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4106-4112.
CHEN Yun, CUI Boyuan, HUANG Changyuan, et al. Life test and prediction of insulator materials for UHV GIL[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4106-4112.

[23] PALLON L K H, NILSSON F, YU S, et al. Three-dimensional nanometer features of direct current electrical trees in low-density polyethylene[J]. Nano Letters, 2017, 17(3): 1402-1408.

[24] 越智光一. 环氧树脂固化物的内部应力[J]. 周俊银，译. 绝缘材料通讯，1990(6)：41-48.
YUEZHI Guangyi. Internal stress of oxygen resin cured material[J]. ZHOU Junyin, translated. Insulation Material Communication, 1990(6): 41-48.

[25] 任晓龙. 不同绝缘缺陷下放电量与 SF_6 分解组分关联特性研究[D]. 重庆：重庆大学，2012.
REN Xiaolong. Research on the correlation characteristics between partial discharge quantity and SF_6 decomposition components under different insulation defects[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2012.

[26] ZHANG S, YANG Y, LI Q, et al. Different microscopic features of AC and DC electrical trees in insulating polymer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(6): 2259-2265.

[27] 张　豪，于继东，裴晓阳，等. 相场断裂方法发展概况[J]. 高压物理学报，2019，33(3)：030109.
ZHANG Hao, YU Jidong, PEI Xiaoyang, et al. An overview of phase field approach to fracture[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(3): 030109.

[28] WILSON Z A, BORDEN M J, LANDIS C M. A phase-field model for fracture in piezoelectric ceramics[J]. International Journal of Fracture, 2013, 183(2): 135-153.

[29] 乐文凯. 电-力耦合载荷下BGA微焊点力学性能和断裂行为及其尺寸效应的研究[D]. 广州：华南理工大学，2020.
LE Wenkai. Study on mechanical properties and fracture behavior as well as their size effects of micro-scale BGA structure solder joints under coupled electro-mechanical loads[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2020.



刘智鹏
1996—，男，硕士生
主要从事 GIL 绝缘子绝缘防护研究工作
E-mail: lzp40@ncepu.edu.cn

LIU Zhipeng



李庆民(通信作者)
1968—，男，博士，教授，博导
从事高电压与绝缘技术、放电物理等领域的研究工作
E-mail: lqmeee@ncepu.edu.cn

LI Qingmin
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2022-12-08　修回日期　2023-07-13　　编辑　曹昭君