

基于电致发光效应的复合绝缘子 内部导通性缺陷检测方法研究

张育铭¹, 耿江海^{1*}, 彭波², 周松松³, 毕建刚³, 侯思祖¹, 何中峰¹, 刘云鹏¹

(1. 河北省输变电设备安全防御重点实验室(华北电力大学), 河北省 保定市 071003; 2. 国家电网有限公司, 北京市 西城区 100031; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192)

Detection Method of Internal Conductivity Defects in Composite Insulators Based on Electroluminescence

ZHANG Yuming¹, GENG Jianghai^{1*}, PENG Bo², ZHOU Songsong³, BI Jiangang³,
HOU Sizu¹, HE Zhongfeng¹, LIU Yunpeng¹

(1. Hebei Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense (North China Electric Power University),
Baoding 071003, Hebei Province, China; 2. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China;
3. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: In recent years, the frequent occurrence of decay-like failures of composite insulators has become a severe issue threatening the safe and stable operation of power systems. These failures are often caused by the development of internal defects in insulators. Traditional detection methods suffer from susceptibility to environmental interference and low detection efficiency, which are not conducive to effective defect identification. This paper proposes a new method for detecting internal conductivity defects in composite insulators based on electroluminescence (EL). Firstly, distortion characteristics of insulator surface electric field with internal defects are analyzed through a finite element model to characterize the internal state of the insulators. Experiments show that ZnS:Cu electroluminescent (EL) composite materials can achieve luminescence response under high electric field conditions when excited by high-energy electron transitions and ultraviolet photons, which are also suitable for the service conditions of insulators. Samples of electroluminescent self-diagnostic composite insulators with internal conductivity defects are fabricated in the laboratory. Charging tests verify that the electroluminescent method can achieve self-identification of internal conductivity defects in insulators, and has high shape fidelity for defects. Finally, a comparative analysis is conducted to reveal the superiority of the proposed method over traditional detection methods. The results show

that the proposed method can effectively identify composite insulators with conductivity defects situated within the blind zones of traditional methods, indicating promising application prospects.

KEY WORDS: composite insulator; electroluminescence (EL); live detection; conductivity defects; electric field distribution

摘要: 近年来, 复合绝缘子的酥朽断裂事故频发已成为威胁电力系统安全稳定运行的严峻问题。酥断事故往往由绝缘子的内部缺陷发展造成, 传统的检测手段面临易受环境干扰、检测效率低等缺点, 不利于缺陷的有效识别。该文提出一种基于电致发光效应的复合绝缘子内部导通性缺陷检测新方法。首先, 通过有限元模型分析含内部缺陷绝缘子的表面电场畸变特征, 可以用于表征绝缘子内部状态; 通过试验发现 ZnS:Cu 电致发光复合材料在高能电子跃迁及紫外光子的激发下可以实现高电场条件下的发光响应, 同时适用于绝缘子服役工况; 在实验室制作含内部导通性缺陷的电致发光自诊断复合绝缘子样品, 通过带电试验验证电致发光效应能够实现绝缘子内部导通性缺陷的自识别, 且对缺陷的形状有较好的还原度; 最后, 对比分析该文所提方法对传统检测方法的优势。结果表明, 该文方法可对位于传统方法检测盲区的含导通性缺陷复合绝缘子进行有效识别, 具有良好的应用前景。

关键词: 复合绝缘子; 电致发光; 带电检测; 导通性缺陷; 电场分布

0 引言

随着我国“双碳”战略目标的全面推进, 超特

高压输电工程已成为构建新型电力系统的骨干骨架。复合绝缘子凭借其优异的防污闪性能、高机械强度、轻量化结构和易于安装等优点,被广泛应用于架空输电线路,在解决电网污闪问题、保障电网安全运行方面发挥了重大作用^[1-3]。截至2024年,在运的110kV及以上电压等级复合绝缘子数量已超过1000万支,成为各类绝缘子中用量最大的绝缘子^[1],其中服役周期超过15年的产品超过130万支,庞大的使用量对复合绝缘子服役状态的评估提出了更高的要求。

在机械应力、电气应力与环境应力的长期综合作用下,复合绝缘子随着使用年限的增加不可避免地出现不同程度的老化,区别于鸟啄损伤、伞套开裂等外部显性缺陷,以复合绝缘子芯棒碳化通道为代表的内部导通性缺陷多为隐蔽性缺陷,常规巡检手段易发生漏检、误检,最终引发绝缘失效、异常断裂等一系列故障的发生^[4-7]。目前针对复合绝缘子内部缺陷的检测手段主要有红外测温法、紫外成像法、电场分布测量法、太赫兹成像法、超声波检测法、X射线法等^[8-11]。其中,紫外成像法极易受环境因素的干扰,电场分布测量法对检测路径的精度有极高的要求,且难以直接获得绝缘子表面的电场分布,太赫兹法、超声波法及X射线法检测过程繁琐,检测效率、精度及人员安全难以得到保障。近年来通过对在运复合绝缘子进行红外普测能够排除部分隐患,但受现场气象、测试距离、绝缘子表面状态、红外设备精度等因素的影响^[12],往往无法对复合绝缘子的温度分布进行精准的测量,进而引起检测结果的误判、漏判,此外,内部导通性缺陷与外部护套老化均会引起复合绝缘子端部的异常发热现象^[13],全部做退运处理会造成人力物力的极大浪费。

电致发光效应(Electroluminescence, EL)是指材料在较高强度交直流电场作用下,通过内部电子与空穴复合将电场能转化为光辐照能的光电现象。电致发光材料凭借自身高效能、快速响应及发光均匀等优点,被广泛应用于光电显示、柔性可穿戴设备、生物传感器等领域^[14-17]。电致发光材料对电场强度的敏感性也意味着其在电气领域有着较为广阔的应用前景。文献[18]对ZnS:Cu复合涂层在无放电和有放电情况下的电致发光特征进行研究,分析其在高电场下的电致发光机制;文献[19-20]研究了ZnS:Cu电致发光薄膜的交流电压传感特性及其温

度漂移补偿,为此类光学电压传感器的设计提供了理论与实验基础;文献[21]提出一种新型变压器绕组绝缘监测方法,能够通过电致发光效应测量绕组之间的电场强度并对绝缘故障进行准确定位;文献[22-23]提出一种基于ZnS:Cu电致发光效应的盆式绝缘子表面电场分布的非接触式测量方法,避免了电场探头测量对绝缘子表面电场产生畸变,提高了测量的准确性。目前,电致发光效应在电力设备的状态检测领域的应用仍处于起步阶段,现有研究大多集中于电压传感与设备表面电场测量,复合绝缘子内部导通性缺陷隐蔽性强,传统检测方法不易检出,危害性较大,基于电致发光效应诊断此类缺陷尚缺乏相关可行性研究。

基于此,本文通过有限元仿真和试验研究,验证采用电致发光技术实现复合绝缘子内部导通性缺陷带电检测的可行性。首先,通过有限元仿真研究了内部导通性缺陷对绝缘子表面电场的影响;而后,对交流电场下ZnS:Cu电致发光复合材料的发光特性进行分析,评估其在复合绝缘子服役工况下的性能适用性;在实验室制作含内部导通性缺陷的复合绝缘子样品,并提出2种电致发光材料与复合绝缘子的结合方案以应对不同应用场景;开展对含内部导通性缺陷复合绝缘子样品的带电试验,验证利用电致发光效应实现内部缺陷自识别的有效性;最后,试验对比红外测温、紫外成像方法与本文所提方法的检测效果。本文方法可以对传统方法检测盲区的复合绝缘子进行有效识别,具有检测结果直观、灵敏度高等优点。

1 复合绝缘子内部缺陷对其表面电场分布的影响

1.1 含内部缺陷复合绝缘子的有限元仿真模型

近年来,以酥朽缺陷为代表的复合绝缘子内部故障对电力系统的安全稳定运行造成严重威胁,其中,复合绝缘子长期运行过程中在湿、电、机械荷载的持续作用下芯棒与护套界面粘接性能的丧失被认为是酥朽断裂故障的主要诱因之一,在高电场的作用下可能会引发由初始的界面空腔局部放电到碳化通道不断延伸的绝缘失效演化过程^[24-25]。图1(a)为某酥朽复合绝缘子高压端芯棒表面的树枝状放电碳化通道形貌。

由于复合绝缘子的电场分布特性,内部导通性缺陷往往起始于电场较为集中的高压端部并沿轴

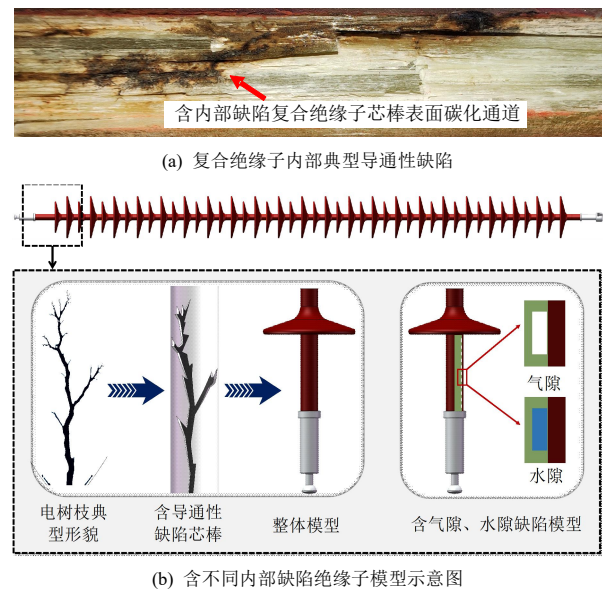


图 1 含内部缺陷的复合绝缘子仿真模型

Fig. 1 Simulation model of composite insulator with internal defects

向延伸，本文参照电树枝典型形貌建立了如图 1(b)所示的含内部导通性缺陷的复合绝缘子仿真模型，其中复合绝缘子由硅橡胶护套、玻璃纤维增强环氧树脂芯棒及端部金具组成，结构高度为 2 210 mm，芯棒直径为 18 mm，伞套厚度为 5 mm，内部树枝状缺陷起始于复合绝缘子高压端金具，长度为 80 mm，厚度为 1 mm。此外，为比较不同类型缺陷对绝缘子电场分布的影响，还建立了含内部气隙、水隙缺陷的复合绝缘子仿真模型，缺陷分布长度、厚度与导通性缺陷一致，由一系列厚度为 1 mm 的环形域组成，通过设置域内不同介电常数以模拟不同介质环境。

采用 Comsol 有限元计算软件的静电模块对含内部缺陷复合绝缘子进行电场分布的分析，计算时绝缘子模型电场分布的求解需满足电场方程：

$$\begin{cases} \nabla \times \boldsymbol{E} = 0 \\ \nabla \cdot \varepsilon \boldsymbol{E} = \rho \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\boldsymbol{E}$ 为介质区的电场强度，V/m； ε 为介质的介电常数； ρ 为电荷体密度，C/m³。在静电场仿真中忽略空间电荷对仿真的影响，得到的电位函数满足：

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (2)$$

如图 2 所示，在复合绝缘子模型的高压端金具施加 179.63 kV 的高电压，另一端金具及无限元域的外表面接地，仿真计算所需的相关材料参数设置如表 1 所示。

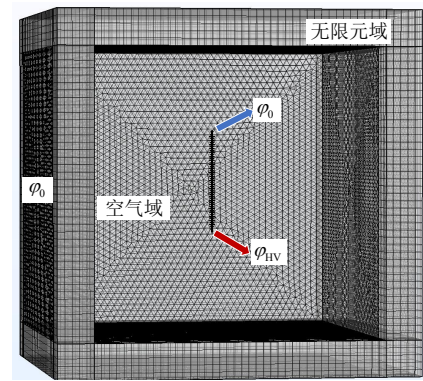


图 2 网格剖分及边界条件设置

Fig. 2 Finite element mesh generation and boundary condition setting

表 1 仿真模型材料相对介电常数

Table 1 Relative permittivity of simulation model material	
参数	数值
伞套	3.4
芯棒	4.6
空气及气隙	1
金具及导通性缺陷	10 000
水隙	81

1.2 含内部缺陷复合绝缘子表面电场分布

本文通过对缺陷设置不同的材料参数，分别仿真计算了正常复合绝缘子与含内部导通性缺陷、气隙缺陷及水隙缺陷复合绝缘子在高电压运行工况下的表面电场分布，为便于比较不同内部缺陷复合绝缘子表面电场的差异性，将复合绝缘子含内部缺陷区域的护套表面沿轴向均分为 17 段，分别提取各段的表面最大电场强度。

由图 3(a)可知，当硅橡胶-芯棒界面存在水分、空气间隙时电场的畸变程度有限，不易通过表面电场的变化识别内部缺陷的存在。性能良好的复合绝缘子在运行电压下的电场分布较为均匀，由图 3(b)可知，仅靠近高压端金具处的护套-金具-空气三介质交界处出现局部电场集中，表面最大电场强度为 2 621.18 kV/m。如图 3(c)所示，内部导通性缺陷会显著影响复合绝缘子护套表面的电场分布，内部导通性缺陷各个分支的头会出现场强集中，在实际运行情况下可能会引发绝缘子护套表面的局部放电现象，其中以整个导通性缺陷的末端的电场集中情况最为严重，最大电场强度达到 3 544.35 kV/m，较完好绝缘子增加约 35.2%。

上述仿真结果表明，通过复合绝缘子表面电场的分布特征可以对其内部导通性缺陷进行识别。目前，亟需提出高效准确的复合绝缘子表面畸变电

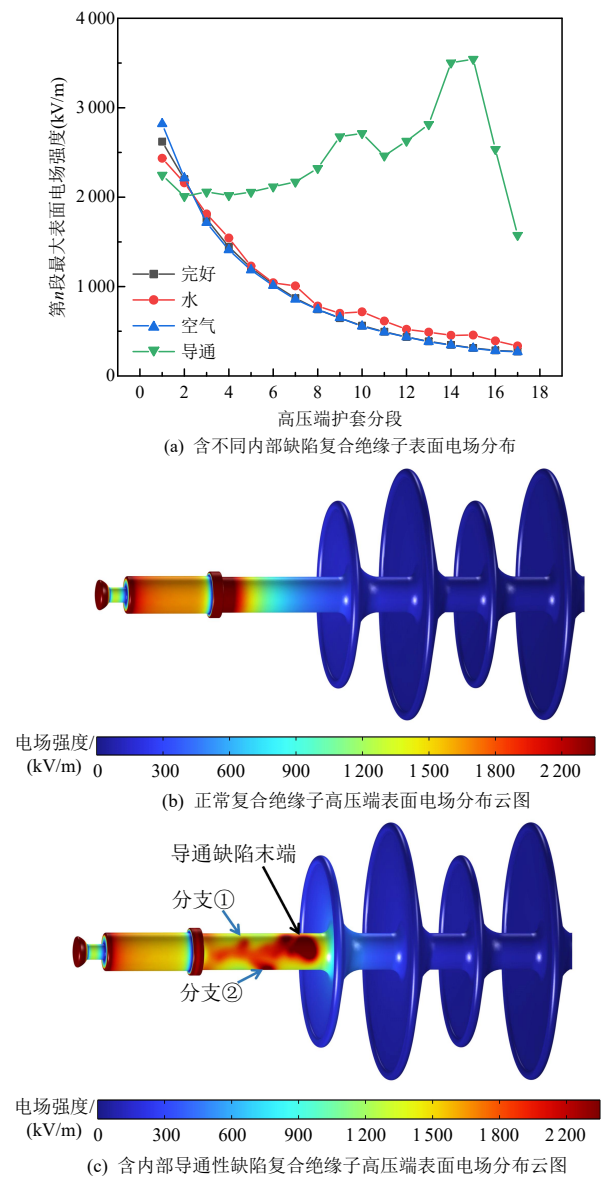


图 3 复合绝缘子高压端表面电场分布

Fig. 3 Surface electric field distribution of high-voltage end of composite insulator

场测量手段,电致发光材料可以实现高电场条件下的发光响应,具有直观显示绝缘子内部导通性缺陷产生的电场畸变的潜力。

2 ZnS:Cu 复合材料的电致发光原理及其性能分析

近年来,基于电致发光效应的功能材料为电气设备表面电场的可视化提供了新思路,本节聚焦于 ZnS:Cu 电致发光复合材料,解析其 EL 激发机制,并评估其在复合绝缘子服役工况下的性能适用性。

2.1 电致发光原理

ZnS 作为一种宽禁带半导体(带隙约 3.7 eV),掺杂 Cu²⁺离子引入受主能级后成为具有较低电导率、较低相对介电常数($\epsilon \approx 5 \sim 10$)的 p 型材料,其低

载流子浓度(空穴为主)不会显著影响绝缘器件的整体绝缘性能,ZnS:Cu 材料混合常用电工绝缘材料制得的复合材料击穿场强在 10 kV/mm 以上^[26],能够保证其应用的安全可靠性。如图 4 所示,外部能量的注入会导致 ZnS 晶格中产生高能电子,激发后的电子和空穴在材料内部跃迁,这些载流子可能会在材料的浅陷阱上停留形成束缚态,不处于束缚态的高能电子与空穴相遇时会开始复合,在复合过程中,电子会被捕获到 Cu²⁺的能级上,形成激发态,当激发态不再稳定时,电子会回到基态,释放出能量以蓝绿色荧光的形式发出,宏观表现为电致发光效应。

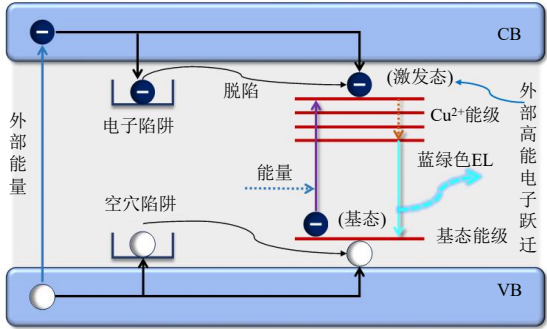


图 4 ZnS:Cu 材料的电致发光机制

Fig. 4 Electroluminescence mechanism of ZnS: Cu material

根据高能电子来源的差异,ZnS:Cu 材料主要有本征、载流子注入和空气电离注入 3 种发光路径,如表 2 所示,本征电致发光的阈值场强远大于复合绝缘子的表面场强,且将材料应用于护套表面后一般不与导电电极接触,故在本文的应用场景下 ZnS:Cu 的发光应由空气电离注入主导。

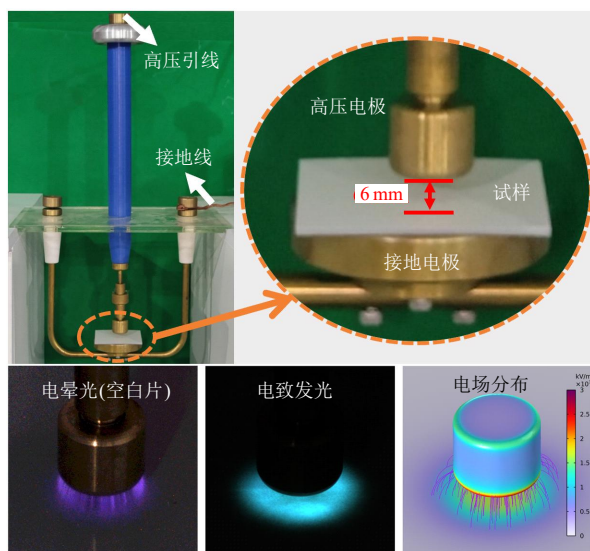
表 2 ZnS:Cu 材料的主要电致发光路径

Table2 Main electroluminescent pathways of ZnS: Cu		
发光路径	高能电子来源	阈值电场强度
本征电致发光	内部 Cu _s S 电离	5 kV/mm ^[27]
载流子注入电致发光	导电电极注入	0.2 kV/mm ^[22]
空气电离注入电致发光	电子迁移、紫外光子激发	起晕场强 ^[18]

2.2 ZnS:Cu 电致发光复合材料的性能分析

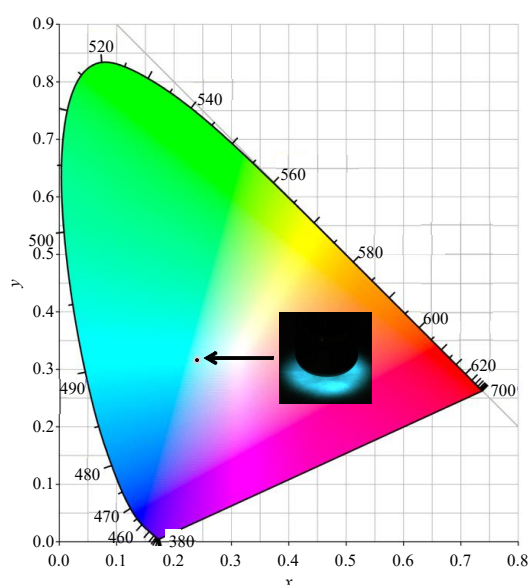
由 2.1 节可知,ZnS:Cu 材料能够对电场敏感响应,具有识别复合绝缘子表面电场畸变的能力,但其对于复合绝缘子服役工况的适用能力仍需讨论。基于此,本文制备了表面喷涂有电致发光复合材料涂层的高温硫化硅橡胶样片进行性能分析,电致发光涂层和高温硫化硅橡胶 (high temperature vulcanized silicone rubber, HTV)试片的厚度分别为 0.3 和 2.5 mm。利用柱-板电极对样品进行电致发光

测试,其中柱电极直径为 25 mm,距试样表面 6 mm,作为高压电极外接至工频高压电源;板电极直径为 100 mm,作为地电极。试验过程中发现,电极的电晕现象(伴随有电晕声)和 ZnS:Cu 材料的电致发光现象在加压至 13.8 kV 时同时产生,如图 5(a)所示,降低电压后又同时消失,说明此时 ZnS:Cu 的发光应由空气电离注入主导,一方面,电离产生的自由电子增加了 ZnS:Cu 材料内部的高能电子浓度,另一方面,紫外光子加速了价带电子向导带迁移的激发过程。如图 5(b)所示,对比国际照明委员会 (Commission Internationale de l'Éclairage, CIE)色度图可知,样品发出的蓝绿色荧光位于(0.2407, 0.3256)。以上结果说明, ZnS:Cu 电致发光复合材料能够对电场畸变引起的空气电离现象做出有效响应。

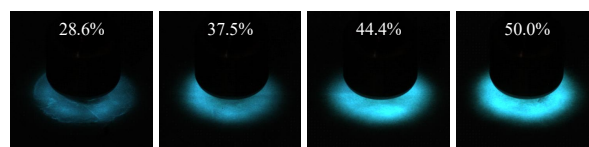


加压至 13.8 kV 时起晕并电致发光

(a) HTV 表面喷涂 ZnS:Cu 复合涂层的电致发光表现



(b) CIE 色度图



(c) 不同 ZnS:Cu 添加比例下的电致发光表现

图 5 ZnS:Cu 复合材料的电致发光表现

Fig. 5 Electroluminescence mechanism of ZnS: Cu material

此外,本文开展了以防污闪室温硫化硅橡胶 (pollution-resistant room temperature vulcanizing silicone rubber, PRTV)为基质,不同 ZnS:Cu 添加比例下的电致发光测试,如图 5(c)所示,发现改变复合材料内 ZnS:Cu 的添加比例并不能使发光现象提前出现,但随着 ZnS:Cu 添加比例的增加,复合材料内部的发光中心密度随之增加,在相同电晕强度下,材料的发光强度和发光区域面积有所增加,约在 44.4% 的添加比例下出现饱和,故本文选择 44.4%(ZnS:Cu/PRTV/硅油 $\approx 1/1/0.3$)作为本文的配方比例。利用体积表面电阻测试仪分别对喷涂/未喷涂电致发光层的样片表面电阻率进行测量,二者的表面电阻率分别为 1.921×10^{14} 和 $1.835 \times 10^{14} \Omega \cdot m$,喷涂发光涂层后的硅橡胶试片表面电阻率略高于未喷涂的,说明在高温硫化硅橡胶表面喷涂电致发光涂层不会对其表面绝缘性能产生影响。

复合绝缘子易发生酥朽的区域多具有高湿高热的环境特征,因此需要保证绝缘子表面具备相当的憎水性能和耐候性能,基于此,本文对表面喷涂有电致发光涂层的高温硫化硅橡胶样片的憎水性能与耐湿热老化性能进行了测试。

ZnS:Cu 电致发光复合涂层的憎水性及憎水迁移性测试参照 DL/T 376—2019^[28]开展,由图 6(a)憎水性检测结果可知,初始洁净状态下的电致发光复合涂层表面的水滴静态接触角大于 90° , 具有较好的憎水性。当电致发光复合涂层表面涂覆污秽后,在起始时刻憎水性出现了一定程度的下降,经过 96 h 的迁移后污秽表面的憎水性得到恢复,试样表面的水滴接触角达到 113° 左右,表明样品具备良好的憎水迁移特性。测试得到的 ZnS:Cu 复合涂层的憎水性和憎水迁移特性均满足 DL/T 376—2019 要求,使用后不会对复合绝缘子硅橡胶材料表面的憎水性能产生较大影响。

随后,开展了 ZnS:Cu 电致发光复合材料的水煮老化试验,测试了不同老化时长(0、72、144 h)后样品的电致发光表现,从图 6(b)湿热老化结果可

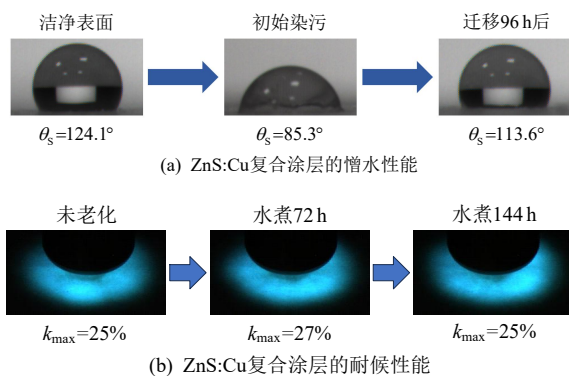


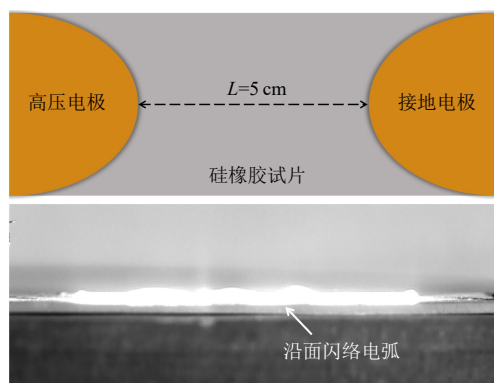
图6 ZnS:Cu复合涂层的憎水及耐候性能表现

Fig. 6 Hydrophobicity and weatherability of ZnS:Cu composite coating

知,在本文的老化试验周期内 ZnS:Cu 电致发光复合涂层表现出一定的耐湿热老化能力,在恒定外施电压下电致发光图像中的最大灰度 k 值未发生较大变化。

最后,为探究 ZnS:Cu 电致发光复合涂层对复合绝缘子沿面闪络电压的影响,本文制备了如图 7(a)所示的沿面闪络测试样品,半椭圆形铜导电电极对称布置于试样两端,长轴半径为 30 mm,短轴半径为 20 mm,厚度为 0.5 mm,两电极间的距离为 50 mm,紧密贴覆于带有电致发光复合涂层的硅橡胶试样表面,持续加压至试样表面发生沿面闪络,利用高速相机捕捉到的沿面闪络电弧,如图 7(a)所示。

从图 7(b)测试结果可知,随着 ZnS:Cu 填料含量的增加,其半导体特性有利于在试样表面引入电荷浅陷阱,提高表面聚集电荷的消散速度,试样的沿面闪络电压也随之提升^[29]。电致发光填料与 PRTV 的含量为 1:1 时,试样的沿面闪络电压趋于稳定。综上,ZnS:Cu 复合涂层的引入不会对复合绝缘子的憎水性能及绝缘性能产生较大影响,同时具有一定的湿热耐候能力,适用于复合绝缘子的典型服役环境。



(a) 试验设置

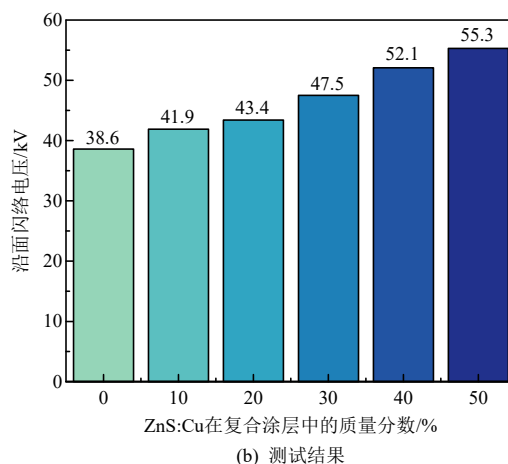


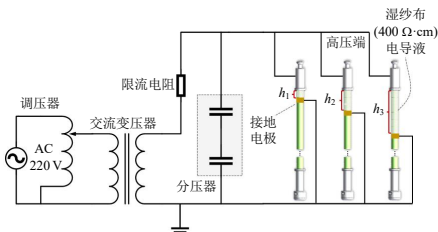
图7 ZnS:Cu 复合涂层对硅橡胶沿面闪络电压的影响

Fig. 7 Effect of ZnS:Cu composite coating on surface flashover voltage of silicone rubber

3 基于电致发光效应的复合绝缘子内部导通性缺陷带电检测

3.1 试验样品

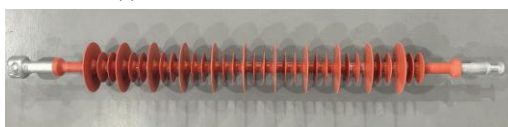
以往研究往往采用在复合绝缘子伞套与芯棒的界面位置埋入钢针、铁丝的方法模拟复合绝缘子内部导通性缺陷,但对实际输电线路退运酥朽绝缘子进行考察后发现,其内部的缺陷大多由导通性一般的水解、碳化通道组成,为尽可能模拟现实缺陷,本文搭建如图 8(a)所示的芯棒表面导通性缺陷制作平台对样品进行预处理。将样品高压端金具连接至工频变压器的高压端输出,在距离高压端金具 $h_1 =$



(a) 芯棒表面导通性缺陷制作平台



(b) 复合绝缘子内部导通性缺陷设置



(c) 加上伞套后的含内部导通性缺陷的复合绝缘子样品

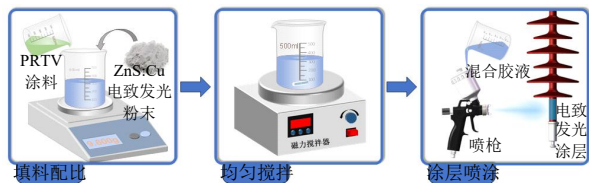
图8 试验样品制备

Fig. 8 Preparation of experimental samples

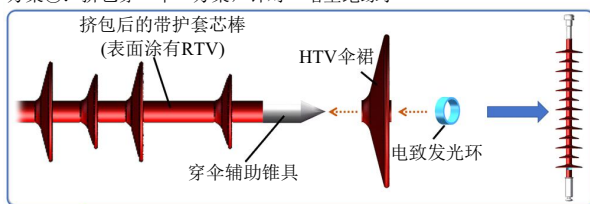
10、 $h_2=20$ 、 $h_3=40$ cm 处的芯棒表面分别设置环形接地电极。完成接线后, 配制电导率为 0.25 S/m 的 NaCl 导电溶液, 裁剪合适长度的医用棉纱布浸湿于导电液中, 而后紧敷于样品高压端金具与接地电极间的芯棒表面制造导电通路, 对样品施加 2 kV 的工频交流电压, 热量的积聚会导致芯棒表面干带的形成进而引发表面电弧由高压端金具向接地电极发展, 待电极间形成连续的水解碳化通道后样品表面击穿, 得到如图 8(b)所示满足要求的样品。考虑到运输便利性及制作周期问题, 本文在样品制作阶段选择在 110 kV 绝缘子芯棒端部制造碳化通道而后注射成型伞套, 其中玻璃钢芯棒的直径为 18 mm, 硅橡胶护套的厚度为 5 mm, 最终得到含内部导通性缺陷的复合绝缘子样品, 如图 8(c)所示。

针对已挂网运行的存量绝缘子和待生产出厂的增量绝缘子, 本文提出如图 9(a)所示 2 种电致发光材料与复合绝缘子的结合方案以应对不同应用场景。方案 1 采用喷涂的方案既适用于存量绝缘子也适用于新出厂的注射成型绝缘子或挤包穿伞绝缘子, 本文选用河北硅谷化工研究院提供的 PRTV 长效防污闪涂料作为复合涂料的基质, 上海科炎光

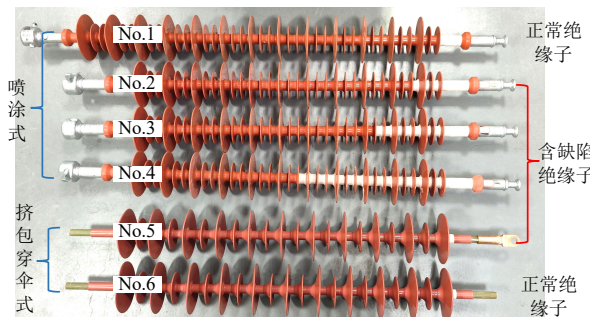
方案①: 喷涂方案, 针对“存量绝缘子”&“增量绝缘子”



方案②: 挤包穿“伞”方案, 针对“增量绝缘子”



(a) 两种电致发光材料结合方案



(b) 制作得到的电致发光缺陷自识别绝缘子样品

图 9 电致发光材料与复合绝缘子的结合方案

Fig. 9 Combination scheme of electroluminescent materials and composite insulators

电技术有限公司生产的长寿命包膜 ZnS:Cu 发光粉末作为填料, 其中 PRTV 的优异耐候性能及包膜 ZnS:Cu 颗粒表面的致密氧化层可以有效提升电致发光复合材料的长期运行可靠性, PRTV 和电致发光粉末的相对介电常数分别为 3.4 和 7.1, 按 1:1:0.3 的比例将 PRTV、电致发光粉末及稀释剂(主成分为二甲基硅油)均匀混合后喷涂至复合绝缘子护套表面, 由于 PRTV 与硅橡胶护套的化学结构高度相似, 可通过分子间作用力和化学键实现紧密结合, 快速固化后能够形成与硅橡胶护套表面紧密连接的电致发光涂层, 涂层厚度约为 300 μm 。

对于方案 2, 本文结合超特高压重点线路主要采用的挤包穿伞绝缘子制作工艺, 在穿伞过程中在复合绝缘子高压端部穿入使用橡胶硫化机制得的电致发光环, 环的主要成分为四甲基四乙烯基环四硅氧烷生胶与 ZnS:Cu 粉末, 宽度为 25 mm, 厚度为 1.5 mm。

需要特别说明的是, 为更好地显示电致发光效应检测内部缺陷的效果, 本文选择对内部缺陷延伸区域对应的护套表面喷涂涂层, 在实际运行中发生缺陷的复合绝缘子, 其电场集中的高压端部往往是内部缺陷起始发展的区域, 同时也是缺陷最为严重的区域, 可以选择仅对复合绝缘子高压端部进行局部喷涂, 以减小涂层对复合绝缘子表面性能的影响, 采用本文所提 2 种方案制得的电致发光复合绝缘子缺陷自识别样品如图 9(b)所示。

3.2 检测平台及方法

结合 1.2 节复合绝缘子表面电场分布仿真结果可知, 当复合绝缘子内部存在导通性缺陷时, 其表面电场分布在缺陷区域会产生较大畸变, 进而引发不同程度的局部电晕现象, 可以利用电致发光材料对畸变电场的敏感性对缺陷区域进行表征, 通过比较正常复合绝缘子和含内部导通性缺陷复合绝缘子带电条件下护套表面电致发光材料的发光特征差异对绝缘子状态进行有效识别。

基于此, 本文搭建如图 10 所示的电致发光测试试验平台对复合绝缘子样品的内部导通性缺陷进行检测。将样品的高压端金具连接至工频高压电源, 另一端串接相同尺寸完好绝缘子后通过接地线接地, 以满足 220 kV 电压等级爬电距离的要求。根据文献[1,6]及国家电网有限公司 2022、2024 年红外普测结果统计, 目前国内外发生的酥朽断裂事故集中发生于 220 kV 及以上电压等级的输电线路中,

110kV 及以下电压等级的酥朽断裂事故鲜有报道^[30], 基于此, 本文选择 $U=127\text{kV}$ (220kV 电压等级对应相电压) 作为施加到复合绝缘子样品高压端的电压值。

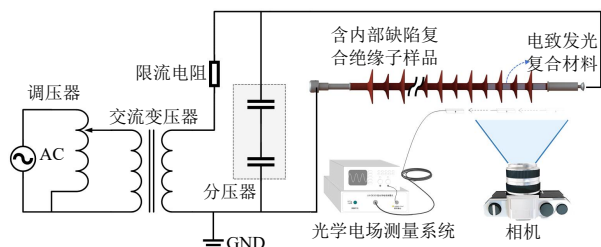


图 10 复合绝缘子电致发光测试平台

Fig. 10 Composite insulator electroluminescence testing platform

加压期间, 布置相机对复合绝缘子样品表面的

电致发光情况进行拍摄记录, 相机的拍摄参数设置为光圈 $f/2.4$, 曝光时间为 0.8s 。同时, 采用光学电场测量系统对复合绝缘子样品的空间电场分布情况进行测量, 光学电场测量系统由 Pockels 光学电场探头、传输光缆及主机组成^[31], 电场强度测量范围为 $30\sim 3\,000\text{kV/m}$, 频率范围为 $5\text{Hz}\sim 40\text{MHz}$, 一部分电绝缘, 对被测电场无干扰, 测试时电场探头测试面与护套表面平行并保持距离为 50mm , 测试由高压端护套起始, 每 2 个大伞间中点位置处作为记录点存储传感器输出波形, 至缺陷末端区段结束。

3.3 试验结果与分析

将相机参数固定不变并保持电压为 127kV , 拍摄本文制备复合绝缘子样品的电致发光图像, 如图 11 所示。

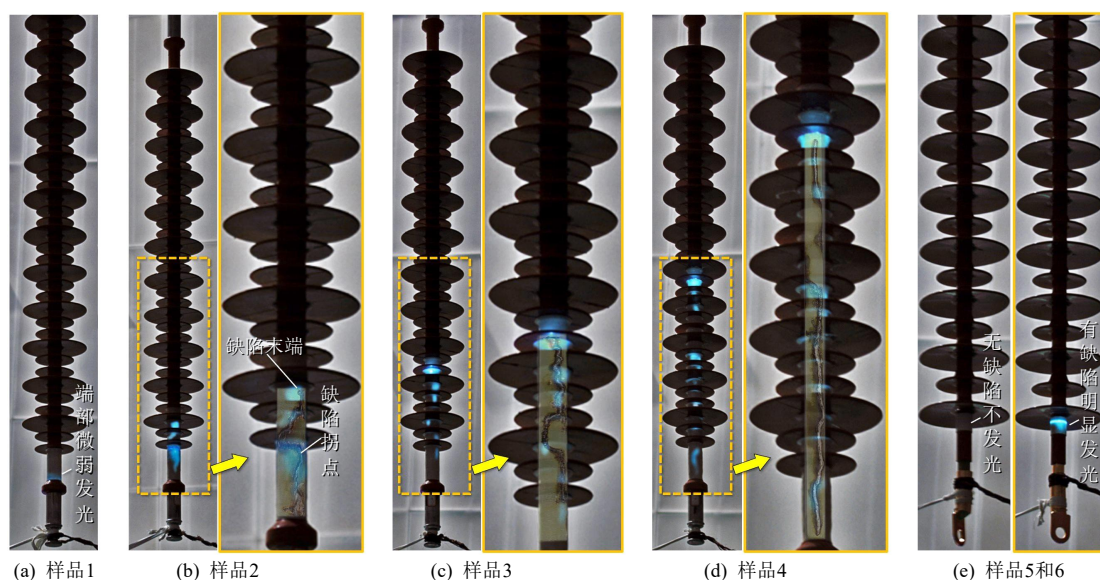


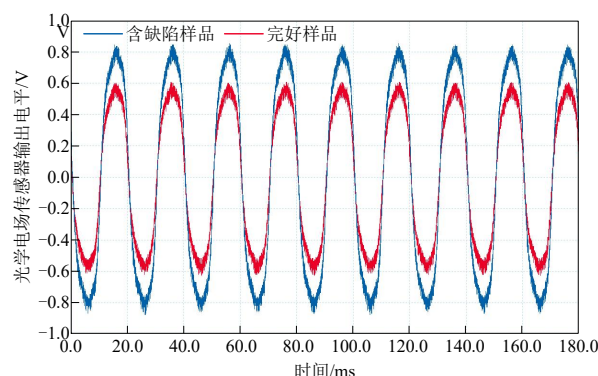
图 11 含内部导通性缺陷复合绝缘子样品的电致发光测试结果

Fig. 11 Electroluminescence test results of composite insulator samples with internal conductor defects

由图 11(a)可知, 当复合绝缘子内部无导通性缺陷时, 仅在其高压端护套表面靠近金具的位置出现微弱发光, 对照图 3(b)仿真得到的正常复合绝缘子高压端表面电场分布可知, 正常复合绝缘子仅靠近高压端金具处的护套-金具-空气三介质交界处会出现局部电场集中, 在其余区域不会出现电场畸变, 这一电场分布特征与正常样品的发光特征测试结果相似。

图 11(b)~(d)为内部含有不同长度导通性缺陷时复合绝缘子样品的电致发光表现, 对比图 12 所示的光学电场传感器测量结果可以看出, 当复合绝缘子内部存在导通性缺陷时, 在缺陷位置处环氧树脂基体的烧蚀、玻璃纤维的裸露断裂引入几何不规则结构, 尖端处电荷密度更高诱发尖端放电现象,

此外缺陷区域材料劣化导致相对介电常数失配和电导率激增, 形成电流集中通道, 导致局部场强急剧增加进而引起电场的畸变^[32], 当表面电场超过复合绝缘子护套表面起晕场强时电致发光复合涂层



(a) 光学电场传感器输出波形示例(含 10 cm 碳化通道样品与完好样品的高压端部护套处的空间电场测量结果)

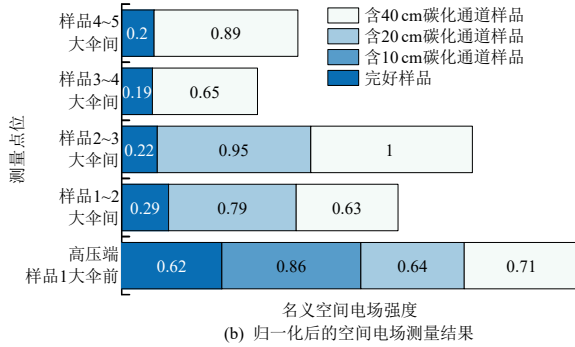


图 12 光学电场传感器测量结果

Fig. 12 Measurement results of optical electric field sensor

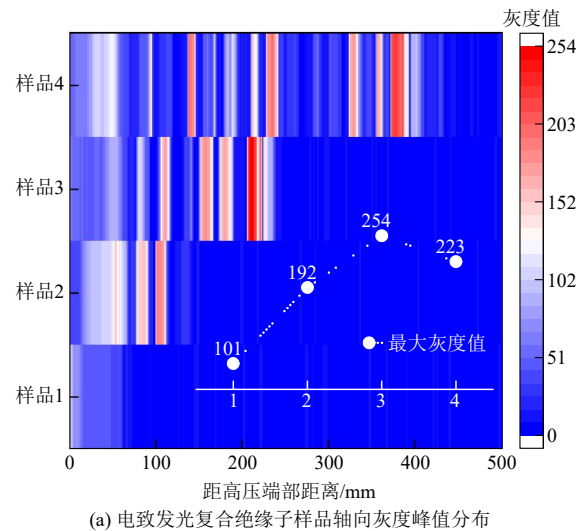
开始发光,从图 11(b)~(d)可以看出,复合绝缘子样品护套表面的电致发光区域与其内部的缺陷形状、分布长度有较好的对应关系,发光区域遍布整段缺陷长度,且在导通性缺陷的末端及其路径上的拐点处电致发光现象尤为剧烈,反应这些区域存在着较为严重的电场集中情况,与图 3(c)仿真结果存在很好的对应关系。图 11(e)为内部含有导通性缺陷时端部穿有电致发光环的挤包穿伞复合绝缘子样品的发光表现,可以看出,在高压端内部存在导通性缺陷时,这种配置方案也能够通过电致发光实现绝缘子内部缺陷的自识别。

为更清晰地对比不同状态复合绝缘子的电致发光特征,量化其内部不同程度导通缺陷引起的表面电场强度差异,本文对采集得到的样品电致发光图像进行灰度处理,以获得复合绝缘子轴向的灰度峰值分布情况:

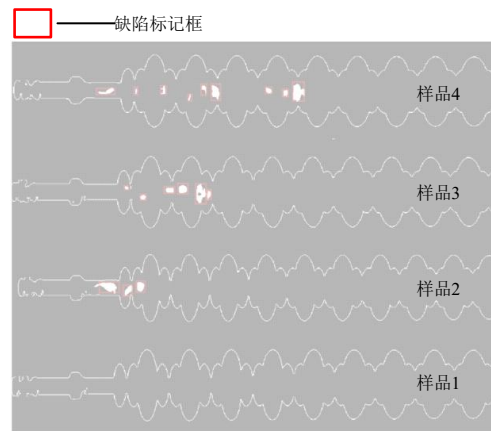
$$G_{\text{ray}}(x, y) = \frac{[R(x, y) + G(x, y) + B(x, y)]}{3} \quad (3)$$

式中: (x, y) 为像素点在图像中的位置坐标; $R(x, y)$ 、 $G(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 分别为原始图像红色分量值、绿色分量值和蓝色分量值,对 3 个颜色通道的分量值取平均即可得到图像每个像素点的灰度值大小,灰度值越大说明此处的电致发光亮度越高、电场集中越严重。将原始图像灰度处理后,提取复合绝缘子样品沿轴向方向的灰度峰值分布,如图 13(a)所示。

从图 13(a)可以看出,含内部导通性缺陷样品的轴向灰度值分布与正常样品存在较大差异,正常样品仅在端部起始区域出现灰度值小幅度增加的情况,而含内部导通性样品在缺陷分布区域内灰度峰值波动较为剧烈,较正常样品数值有较大提高。不同于正常样品最大灰度值出现在端部护套-金具-空气三介质交界处的情况,缺陷的存在使电场在缺陷周围重新分布,导致含内部导通性样品的最大灰度



(a) 电致发光复合绝缘子样品轴向灰度峰值分布



(b) 缺陷标注结果

图 13 电致发光复合绝缘子样品灰度响应分析

Fig. 13 Gray scale response analysis of electroluminescent composite insulator samples

值往往出现在缺陷的末端位置,最大灰度值相较于正常样品平均增加幅度超过 100%。对比图 12 光学电场传感器测量结果发现,内部导通性缺陷对复合绝缘子表面电场造成的畸变程度远大于空间电场,说明本文所提方法相较于传统空间电场检测法对缺陷检测具有更高的响应灵敏度,且检测结果不会受传感器位置扰动的影响。

此外,为实现在绝缘子上对缺陷位置进行直观标注,本文将正常样品的端部发光灰度最大值作为判断阈值,将其余样品表面发光灰度值超过此阈值的区域识别为内部缺陷所在位置,通过对这些高发光区域的空间分布进行二值化分割映射,识别出绝缘子内部缺陷的分布情况如图 13(b)所示,缺陷识别区域与内部缺陷位置呈现显著的空间相关性。

试验结果表明,通过复合绝缘子护套表面电致发光材料的发光特征可以实现其内部导通性缺陷的带电检测,且发光亮度越大说明该处的电场越集

中，其内部的缺陷程度越严重，这种方法不仅可以检测出内部导通性缺陷的有无，还可以反应出缺陷在复合绝缘子内部的发展路径，对缺陷的形状有较好的还原度。此外，复合绝缘子表面的电致发光材料仅在绝缘子内部存在导通性缺陷时才会发光，正常时不发光，保证了其发光寿命不会提前衰减，有利于其长期运行。

4 基于电致发光的复合绝缘子状态检测方法与传统检测方法对比

现有针对复合绝缘子较为成熟的带电检测技术主要包括红外测温技术与紫外成像技术，其中红外测温技术近年来在线路巡检中得到了广泛应用并取得了较好的效果。对于复合绝缘子而言，内部导通性缺陷和硅橡胶护套老化吸潮均会引起其异常发热，研究人员期望利用红外图谱对二者进行有效区分^[33-35]，现有研究得到的较为明确的复合绝缘子的温升特征与发热原因的对应关系如表 3 所示。

除表内温升特征外，对于异常温升区域仅高压段 1 处、温升幅值 $3^{\circ}\text{C}<\Delta T\leq 10^{\circ}\text{C}$ 的复合绝缘子目前通过红外测温手段仍无法准确判断其发热原因，为红外测温方法的检测盲区。在文献[24]统计分析的

表 3 异常发热复合绝缘子典型发热特征

Table 3 Typical heating characteristics of abnormal heating composite insulators

异常发热原因	温升幅值特征	温升区域特征
护套老化	$\Delta T<3^{\circ}\text{C}$	仅高压段 1 处
内部导通性缺陷	$\Delta T>10^{\circ}\text{C}$	>1 处

117 支异常发热样品中，位于红外检测盲区的样品数为 16 支，约占样品总数的 14%，若对位于红外检测盲区的绝缘子均采用更换的运维策略会消耗大量的人力物力，大大增加运维成本。

为对比传统红外、紫外检测方法与本文所提电致发光检测方法针对上述检测盲区复合绝缘子的检测效果，本文选取了符合前述红外盲区特征的含内部导通性缺陷的复合绝缘子样品(内部导通性缺陷，长度为 10 cm)和现场退运护套老化复合绝缘子样品，分别进行带电红外温升特征、紫外放电特征及电致发光特征测试，试验接线与 3.2 节一致，对待测样品加压 30 min，待温度稳定后使用 FLIR T1010 型红外热像仪记录复合绝缘子的温升特征，使用 OFIL Uvolle-VX 型手持式紫外成像仪记录复合绝缘子的放电特征，使用可见光相机记录复合绝缘子的电致发光特征，试验结果如图 14 所示。

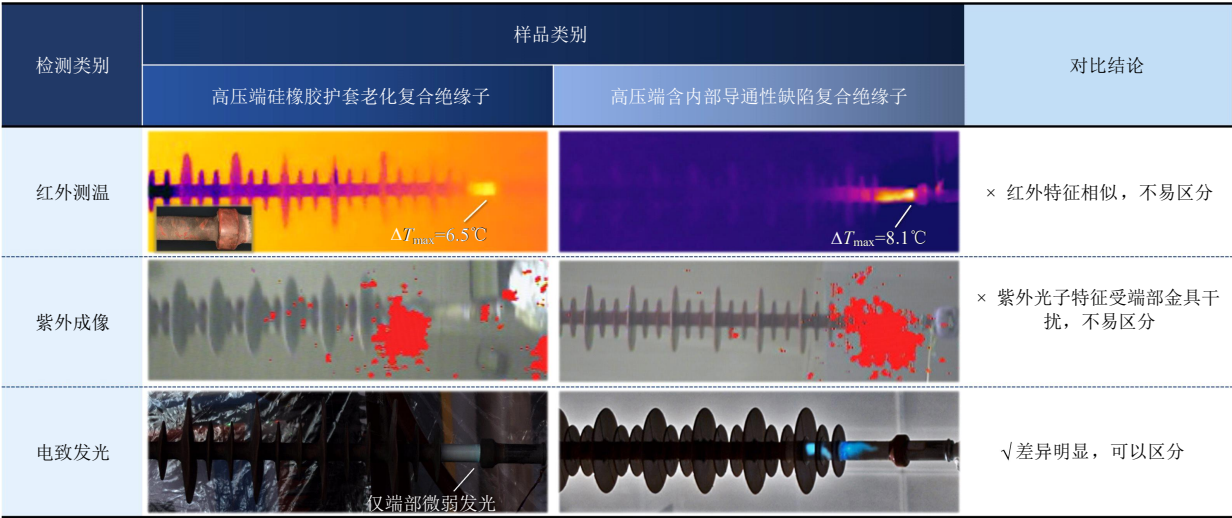


图 14 位于红外检测盲区复合绝缘子样品的测试结果对比

Fig. 14 Comparison of test results of composite insulator samples located in the blind area of infrared detection

对比图 14 红外测温结果可以发现，位于红外检测盲区的 2 支样品温升特征十分相似，发热区域都局限于高压段且温升值 $3^{\circ}\text{C}<\Delta T\leq 10^{\circ}\text{C}$ ，仅通过红外测温无法判断异常发热原因是护套老化还是内部缺陷。对比样品的紫外成像检测结果可以发现，样品端部均存在紫外放电情况，由导通性缺陷放电产生的紫外光子和端部金具电晕产生的紫外光子

交叉重叠，无法通过紫外光斑特征判断样品是否存在内部导通性缺陷。基于上述原因，红外测温技术与紫外成像技术对于部分导通性缺陷局限在高压端部的绝缘子无法有效检出。

护套老化绝缘子硅橡胶材料的介质损耗因子的增加造成极化损耗功率增大，最终引起材料的异常发热，在此过程中不涉及局部放电等能够引起电场

集中的因素，其表面电场分布特征与内部发展有导通性缺陷的复合绝缘子存在较大差异。此外，高压端金具的电场集中主要影响金具和相邻护套较小区域表面的空气电离过程，并不显著改变护套表面的电场分布，因此对护套表面电致发光材料的发光干扰较小。如图14所示，位于传统方法检测盲区的两类缺陷样品的电致发光特征存在显著差异，故可以利用电致发光效应对两种缺陷类型的样品进行有效区分。至此，如图11、14所示，本文所提检测方法对包括位于红外检测盲区样品在内的7支样品均表现出较好的内部导通性缺陷识别效果，这些样品包括正常、护套老化和含内部导通性缺陷等服役绝缘子的典型状态类型，具有一定的代表性。

综上，当前运维部门常用的检测手段对内部缺陷发展至一定程度后的复合绝缘子有较好的检测效果，而对于内部导通性缺陷局限在高压端附近的复合绝缘子的检测效果较为有限，且现场复合绝缘子复杂运行环境条件(如高空大风、湿雾等)对2种检测手段的检测结果的影响较大^[36-37]，而基于电致发光效应的检测手段可以有效弥补传统检测方法的不足，能够对传统方法检测盲区的复合绝缘子进行有效检出。

5 结论

本文提出一种基于电致发光效应的复合绝缘子内部缺陷检测新方法，对含内部导通性缺陷的复合绝缘子样品开展了实验室条件下的带电检测，分析了传统检测方法的局限性及本文所提方法对含缺陷复合绝缘子样品检测的有效性，得到主要结论如下：

1) 通过对完好复合绝缘子样品与内部含导通性缺陷的复合绝缘子样品的有限元计算结果及光学电场传感器的测量结果说明，内部导通性缺陷会导致复合绝缘子护套表面的电场出现畸变，与完好复合绝缘子护套表面的电场分布特征存在较大差异，表面最大场强增加35.2%；

2) 当外部电场强度达到电致发光材料表面空气的起晕场强时，在能电子跃迁及紫外光子的激发下，以ZnS:Cu为主要原料的电致发光复合材料内部的载流子会通过不断激发-复合的方式将电能转化为光能，对外表现为蓝绿色可见光，且发光强度与电场强度呈正相关；

3) 基于电致发光效应的检测手段可以实现复

合绝缘子内部导通性缺陷的有效检出，本文所提方法不仅可以检测出与实际退运绝缘子缺陷特征相似的内部导通性缺陷的长度，还可以反应出缺陷在复合绝缘子内部的发展路径，且对缺陷的形状、位置有较好的还原度；

4) 对比红外测温、紫外成像等传统复合绝缘子巡检方法与本文所提的基于电致发光效应的检测新方法对不同缺陷样品的带电检测效果可得，本文提出的方法可以为解决传统检测方法无法对内部缺陷局限在高压端附近的复合绝缘子进行准确识别的难题提供一种新思路，此外，在现场复杂环境巡检作业时，可见光相机相较于红外热像仪及紫外成像仪有较强的抗环境干扰能力。

后续的研究计划如下。

1) 进一步细化研究电致发光材料的长期运行可靠性提升策略，聚焦于产品配方工艺的改良，获得更加满足复合绝缘子服役环境要求的复合发光材料体系；

2) 形成面向现场挂网应用的新型缺陷自识别复合绝缘子产品，在典型区域开展挂网试运行，评估产品在现场复杂环境、机械、电气应力作用下的综合性能。

致 谢

本文中部分试验样品的制备工作是在襄阳国网合成绝缘子有限责任公司、长园高能电气股份有限公司、河北硅谷化工有限公司等单位的大力支持下完成的，在此向他(她)们表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 梁曦东, 仵超, 左周, 等. 高电压有机外绝缘发展综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7412-7425. LIANG Xidong, WU Chao, ZUO Zhou, et al. Review and prospects for development of high voltage outdoor organic insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7412-7425(in Chinese).
- [2] 舒印彪, 张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 1-6. SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang. Research of key technologies for UHV transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 1-6(in Chinese).
- [3] 梁曦东, 高岩峰, 王家福, 等. 中国硅橡胶复合绝缘子快速发展历程[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2888-2896. LIANG Xidong, GAO Yanfeng, WANG Jiafu, et al. Rapid development of silicone rubber composite insulator in China[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9):

- 2888-2896(in Chinese).
- [4] 郭裕钧, 杨晨光, 张血琴, 等. 川藏铁路环境车顶绝缘子闪络特性研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 472-482.
- GUO Yujun, YANG Chenguang, ZHANG Xueqin, et al. Review on flashover characteristics of train roof insulators under environments on Sichuan-Tibet railway [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 472-482(in Chinese).
- [5] 梁曦东, 高岩峰. 复合绝缘子酥朽断裂研究(一): 酥朽断裂的主要特征、定义及判据[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4778-4785.
- LIANG Xidong, GAO Yanfeng. Study on decay-like fracture of composite insulator: part I-the principal character, definition and criterion of decay-like fracture [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4778-4785(in Chinese).
- [6] CHENG L, MEI H, WANG L, et al. Research on aging evaluation and remaining lifespan prediction of composite insulators in high temperature and humidity regions [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(5): 2850-2857.
- [7] MAVRIKAKIS N C, MIKROPOULOS P N, SIDERAKIS K. Evaluation of field-ageing effects on insulating materials of composite suspension insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 490-498.
- [8] 王胜辉, 律方成, 刘云鹏. 复合绝缘子电晕放电紫外图像参数的变化特性及放电电量估计[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 233-240.
- WANG Shenghui, LYU Fangcheng, LIU Yunpeng. Variation characteristic of composite insulator corona discharge ultraviolet image parameter and estimation of discharge magnitude[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 233-240(in Chinese).
- [9] 江怀远, 梅红伟, 刘建军, 等. 基于 PCA 技术的复合绝缘子内部缺陷太赫兹融合参量成像方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(05): 2029-2040.
- JIANG Huaiyuan, MEI Hongwei, LIU Jianjun, et al. Research on terahertz fusion parameter imaging method of composite insulator internal defects based on PCA technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 2029-2039(in Chinese).
- [10] YUAN Chao, XIE Congzhen, LI Licheng, et al. Ultrasonic phased array detection of internal defects in composite insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1): 525-531.
- [11] 刘云鹏, 李泳霖, 裴少通, 等. 基于紫外光辐射照度特征的污秽瓷绝缘子绝缘状态评估方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1622-1631.
- LIU Yunpeng, LI Yonglin, PEI Shaotong, et al. Evaluation of the insulation state of contaminated porcelain insulators based on characteristics of ultraviolet irradiance[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1622-1631(in Chinese).
- [12] 李特, 陶瑞祥, 张锐, 等. 典型发热缺陷复合绝缘子红外特征及无人机红外测试参数选择[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 865-875.
- LI Te, TAO Ruixiang, ZHANG Rui, et al. Infrared characteristic of typical composite insulator heating defects and selection of field unmanned aerial vehicle infrared test parameters[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 865-875(in Chinese).
- [13] 程养春, 李成榕, 陈勉, 等. 高压输电线路复合绝缘子发热机理的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(5): 57-60.
- CHENG Yangchun, LI Chengrong, CHEN Mian, et al. Research on heating mechanism of composite insulator of high voltage transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 57-60(in Chinese).
- [14] LARSON C, PEELE B, LI S, et al. Highly stretchable electroluminescent skin for optical signaling and tactile sensing[J]. Science, 2016, 351(6277): 1071-1074.
- [15] PUST P, SCHMIDT P J, SCHNICK W. A revolution in lighting[J]. Nature Materials, 2015, 14(5): 454-458.
- [16] ZUO Yong, SHI Xiang, ZHOU Xufeng, et al. Flexible color-tunable electroluminescent devices by designing dielectric-distinguishing double-stacked emissive layers [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(50): 2005200.
- [17] WANG Jiangxin, YAN Chaoyi, CHEE K J, et al. Highly stretchable and self-deformable alternating current electroluminescent devices[J]. Advanced Materials, 2015, 27(18): 2876-2882.
- [18] 朱明晓, 郭小渤, 李孟陶, 等. 高电场下 ZnS: Cu 复合涂层的电致发光机理[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5693-5702.
- ZHU Mingxiao, GUO Xiaobo, LI Mengtao, et al. Electroluminescence mechanism of ZnS: Cu composite coatings under high-electric-field[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5693-5702(in Chinese).
- [19] 李长胜, 陈佳, 王伟岐, 等. ZnS: Cu 电致发光电压传感器及其温度漂移补偿[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 514-521.
- LI Changsheng, CHEN Jia, WANG Weiqi, et al. ZnS: Cu electroluminescent voltage sensor and its temperature

- drift compensation[J]. Chinese Optics, 2017, 10(4): 514-521(in Chinese).
- [20] 贾云飞, 汲胜昌, 杨欣颐, 等. 基于电致发光效应的电压传感特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5547-5557.
- JIA Yunfei, JI Shengchang, YANG Xinyi, et al. Study on voltage sensing characteristics based on electroluminescent effect[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5547-5556(in Chinese).
- [21] JIA Yunfei, JI Shengchang, BU Zewei, et al. An insulation monitoring method for transformer windings based on electroluminescence effect[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(3): 1294-1301.
- [22] JI Shengchang, JIA Yunfei, YANG Xinyi, et al. A method for measuring electric field distribution along insulator surfaces based on electroluminescence effect and its image processing algorithm[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(3): 939-947.
- [23] 杨欣颐, 贾云飞, 高璐, 等. 基于电致发光效应的绝缘子表面场强测量方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1411-1419.
- YANG Xinyi, JIA Yunfei, GAO Lu, et al. Method for measuring surface electric field intensity of insulators based on electroluminescence effect[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1411-1419(in Chinese).
- [24] 钟正. 高湿环境下复合绝缘子芯棒酥朽劣化机制及温升特性研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2022.
- ZHONG Zheng. Research on decay-like deterioration mechanism and temperature rise characteristics of composite insulator rod under high humidity[D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2022(in Chinese).
- [25] 彭雅楠, 李文栋, 曾世胤, 等. 界面湿放电下护套 ATH 填料析出对绝缘子芯棒酥朽老化的影响[J]. 高电压技术, 2024, 50(4): 1673-1683.
- PENG Yanan, LI Wendong, ZENG Shiyin, et al. Effect of HTV housing ATH filler precipitation on decay-like aging of FRP core rod under interfacial wet discharge condition[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1673-1683(in Chinese).
- [26] QI Wen, LIU Miao, CHEN Siqi, et al. Optimising the electroluminescence performance of ZnS : Cu/epoxy composites via exploring the relationship between electroluminescence intensity and filler intrinsic attributes[J]. High Voltage, 2022, 7(6): 1099-1110.
- [27] 饶伟佳. ZnS: Cu 复合材料发光机理及发光特性调控方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2024.
- RAO Weijia. Deterioration characteristics and mechanism of materials in composite insulator under high humidity [D]. Beijing: Tsinghua University, 2024(in Chinese).
- [28] 国家能源局. 聚合物绝缘子伞裙和护套用绝缘材料通用技术条件: DL/T 376—2019[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- National Energy Administration. General technical requirements of insulation materials for umbrella skirt and sheath of polymeric insulators: DL/T 376—2019[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2019(in Chinese).
- [29] XIA Bing, ZHU Mingxiao, GUO Xiaobo, et al. High permittivity electroluminescence coating for improving flashover strength and visualizing surface defects[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2025, 58(5): 055503.
- [30] 卢明, 高超, 李子岳, 等. 复合绝缘子酥朽断裂事故的分布规律研究[J]. 高压电器, 2024, 60(2): 133-142.
- LU Ming, GAO Chao, LI Ziyue, et al. Study on Distribution of Decay-like Fracture of Composite Insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 133-142(in Chinese).
- [31] 王平, 陈雅茜, 姚修远, 等. 海拔 2200m 地区正极性操作冲击下大尺寸球-板间隙放电转化特性[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 6112-6124.
- WANG Ping, CHEN Yaxi, YAO Xiuyuan, et al. Discharge conversion characteristics of large size sphere-plane gap under positive switching impulse voltage at altitude of 2200m[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 6112-6124(in Chinese).
- [32] 卢明, 张中浩, 李黎, 等. 复合绝缘子酥朽发热老化的原因分析[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1335-1341.
- LU Ming, ZHANG Zhonghao, LI Li, et al. Study on distribution of decay-like fracture of composite insulator [J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1335-1341(in Chinese).
- [33] 曹雯, 杨特, 申巍, 等. 变湿度条件下不同老化程度复合绝缘子的红外温升行为及特征分析[J/OL]. 电工技术报, 2025[2025-04-08]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.241615>.
- CAO Wen, YANG Te, SHEN Wei, et al. Infrared temperature rise behavior and characteristic analysis of composite insulators with different aging degrees under variable humidity conditions[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025[2025-04-08]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.241615>(in Chinese).
- [34] 袁之康. 高湿环境下复合绝缘子材料劣化特性及机理

- [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
- YUAN Zhikang . Deterioration characteristics and mechanism of materials in composite insulator under high humidity[D] . Beijing : North China Electric Power University (Beijing), 2019(in Chinese).
- [35] 张思达. 复合绝缘子“灯笼串型”发热故障机理及其应对措施研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2023.
- ZHANG Sida. Study on the mechanism and solution to the ‘lantern type’ heating defect of composite insulators [D]. Chongqing: Chongqing University, 2023(in Chinese).
- [36] 张东东, 万武艺, 黄宵宁, 等. 基于热-电-流耦合的芯棒碳化复合绝缘子发热特性研究[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 3010-3017.
- ZHANG Dongdong, WAN Wuyi, HUANG Xiaoning, et al . Heat generation characteristics of mandrel carbonized composite insulators based on heat-electricity-flow coupling[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 3010-3017(in Chinese).
- [37] 尹林, 胡京, 王文彬, 等. 环境条件对基于无人机红外

检测的零值绝缘子检测判据的影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2023, (5): 171-177.

YIN Lin, HU Jing, WANG Wenbin, et al. Influence of environmental conditions on zero-value insulator detection criteria based on infrared detection through UAV[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023, (5): 171-177(in Chinese).



张育铭

在线出版日期: 2025-05-26。

收稿日期: 2025-03-20。

作者简介:

张育铭(1998), 男, 博士研究生, 主要从事复合绝缘材料的老化特性、绝缘子检测和外绝缘方面的研究工作, 120222101036@ncepu.edu.cn;

*通信作者: 耿江海(1980), 男, 博士, 正高级实验师, 主要研究方向为高电压试验技术和外绝缘, gengjianghai@163.com。

(编辑 张蕾)