

基于振动模态的复合绝缘子酥朽检测与诊断方法

刘志超¹, 郑书生¹, 陈闽江², 关安旭³

(1. 华北电力大学 新能源电力系统全国重点实验室, 北京 102206;

2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007;

3. 比亚迪股份有限公司, 广东 深圳 518118)

摘要:首先对芯棒酥朽试样的理化特征进行分析,并研究芯棒酥朽对其力学性能的影响,然后利用仿真对复合绝缘子芯棒的振动模态进行分析,研究特征频率与酥朽程度的关系,最后针对酥朽复合绝缘子提出了一种振动激励检测方法,并对存在不同程度酥朽缺陷的 110 kV 复合绝缘子芯棒的振动模态特征频率进行测量分析。结果表明:芯棒中环氧树脂的完全降解以及玻璃纤维的水解、粉化使酥朽区域丧失力学性能,导致芯棒整体刚度、抗拉伸性能、抗形变性能降低;与完好芯棒相比,酥朽芯棒 3~5 阶振动模态的特征频率降低了 2.8%~14.3%,高阶振动模态的特征频率降幅更明显,降幅随酥朽程度增大而增大。基于振动模态的酥朽检测方法可以对复合绝缘子的酥朽程度进行诊断,同时可以反映其力学性能变化,适用于复合绝缘子酥朽的无损检测。

关键词:复合绝缘子;酥朽检测;力学性能;振动模态;特征频率

Detection and diagnosis method for decay-like of composite insulator based on vibration mode

LIU Zhichao¹, ZHENG Shusheng¹, CHEN Minjiang², GUAN Anxu³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electric Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350007, China;

3. BYD Company Limited, Shenzhen 518118, China)

Abstract: Firstly, the physico-chemical characteristics of the decay-like core rod were analyzed, and the effect of decay-like on the mechanical properties of the core rod was studied. And then, the vibration modes of composite insulator core rods were analyzed by simulation, and the relationship between characteristic frequency and the decay-like degree was studied. Finally, a vibration excitation detection method was proposed for decay-like composite insulator, and the characteristic frequencies of the 110 kV composite insulators with different degrees of decay-like defects were measured and analyzed. The results show that the complete degradation of epoxy resin and the hydrolysis and pulverization of glass fibers in the core rod make the decay-like region loss mechanical properties, leading to the decrease in the overall stiffness, tensile resistance, and deformation resistance of the core rod. Compared with the intact core rod, the characteristic frequencies of 3-5 order vibration mode of decay-like core rod decrease by 2.8%-14.3%, the decreasing range of characteristic frequencies of higher order vibration modes decrease more obvious, and the decreasing range increases with the increase of decay-like degree. The decay-like detection method based on vibration mode can diagnose the decay-like degree of composite insulator, and also can reflect the changes of its mechanical properties, which is suitable for non-destructive detection of decay-like in composite insulators.

Key words: composite insulator; decay-like detection; mechanical properties; vibration mode; characteristic frequency

0 引言

复合绝缘子是输电系统中重要的绝缘设备之一,在输电线路路上不仅起着支撑导线的作用,还能防止电流回地^[1]。硅橡胶复合绝缘子主要由芯棒、伞裙护套和金具 3 部分构成,具有良好的力学性能

和防污闪性能,且体积小、质量轻,被广泛应用在 110 kV 及以上电压等级的输电线路中^[2-4]。由于在户外遭受水汽,酸性介质,电、热、机械应力等影响,复合绝缘子长期运行后可能会出现各种断裂情况。近些年,国内输电线路发生多起复合绝缘子断裂故

障,其中近一半的断裂故障是由于复合绝缘子酥朽引起,且多发生于沿海潮湿地区^[5]。不同于脆性断裂和普通的机械断裂,复合绝缘子酥朽断裂是多应力老化的结果,多为隐蔽性缺陷,无法通过外观直接发现^[6-7]。复合绝缘子酥朽断裂会引起严重的掉串事故,不利于输电线路的安全稳定运行,故研究复合绝缘子的酥朽劣化特征、明确酥朽检测方法对于及时发现其酥朽缺陷、预防断裂故障具有重要意义。

目前,常用绝缘子缺陷检测方法主要有红外检测法、紫外检测法、超声波检测法、电场测量法以及声振检测法^[8-12]。复合绝缘子发生酥朽劣化早期会伴随异常温升现象,红外检测法可以利用复合绝缘子外层温度变化检测酥朽缺陷^[13-15]。DL/T 664—2016中规定当复合绝缘子温升达到 $0.5\sim 1.0\text{ K}$ 时,可判断为存在缺陷^[16]。酥朽复合绝缘子因绝缘性能降低将产生电晕和局部放电现象,紫外检测法便是通过放电过程中的紫外图谱变化进行酥朽检测。超声波检测法利用材料的声学特性,通过测量材料劣化对超声波传播的影响来检测复合绝缘子的内外缺陷。电场测量法主要通过测量电场分布曲线实现对复合绝缘子内绝缘缺陷的检测。复合绝缘子的振动模态参数是材料的固有参数,当复合绝缘子存在缺陷导致力学性能发生变化时,其模态参数也将改变^[17-18]。声振检测法便是利用结构机械振动产生的振动信号或声信号对结构进行模态分析,从而检测、定位以及量化缺陷并在一定程度上反映结构的力学性能变化,常用于机械轴、结构梁以及柱状结构中缺陷的无损检测^[19-21]。目前,声振法在支柱绝缘子无损检测领域应用较广泛,但在复合绝缘子缺陷检测方面的应用较少。

本文在探究复合绝缘子酥朽特性的基础上,研究芯棒酥朽过程中力学性能的变化,并利用仿真与实验测试分析复合绝缘子振动模态频率与酥朽程度的关联关系,从而提出一种利用机械振动信号中的特征频率检测酥朽缺陷的方法。

1 复合绝缘子芯棒酥朽发展试验

复合绝缘子的酥朽老化会导致其性能改变。为了探究酥朽老化对绝缘子性能劣化的影响并寻求能够量化这种劣化的特征量,需要对复合绝缘子的酥朽老化过程进行研究。然而实际复合绝缘子

的酥朽老化过程漫长,为此本研究搭建了如图1所示的酥朽老化模拟实验平台,利用该平台可在尽可能保证环境贴合实际的基础上对复合绝缘子进行人工加速老化。本节主要探讨芯棒酥朽过程中的劣化发展情况,试验对象选取国内某厂家生产的 $110\text{ kV}/100\text{ kN}$ 复合绝缘子,将其加工为无橡胶护套的芯棒(类型1)、带部分橡胶伞裙的芯棒(类型2)两种类型,试样长度为 150 mm ,直径为 18 mm ,如图2所示。利用雾化 NaCl 溶液模拟潮湿环境,在 15 kV 试验电压下将试样放置在高低压电极间进行酥朽试验,试样试验部分长度为 100 mm 。

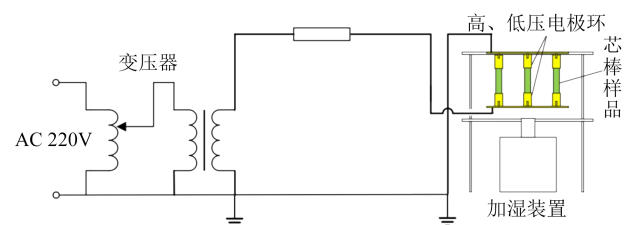


图1 酥朽老化模拟实验平台

Fig.1 Decay-like ageing simulation experimental platform



图2 芯棒试验试样

Fig.2 Core rod test samples

对两种类型芯棒各取3根试样进行酥朽试验,记录酥朽过程中试样的宏观变化,发现试样劣化均经历了4个阶段,具体过程如图3所示。从图3可以看出,初始芯棒试样表面平整,呈翠绿色;经过 24 h 加压老化后,芯棒表面开始出现水解通道,表面变得粗糙并出现白色粉末状物质,未酥朽部分变化不明显;继续加压至 48 h 后,芯棒高压侧表面开始出现碳化痕迹;随着试验的继续进行,碳化痕迹逐渐扩大,形成碳化通道并向低压端发展,最终贯穿整个芯棒;在阶段四,芯棒酥朽部分内部的玻璃纤维完全暴露且呈现松散状态,酥朽老化部分的直径相比于未酥朽部分减小。

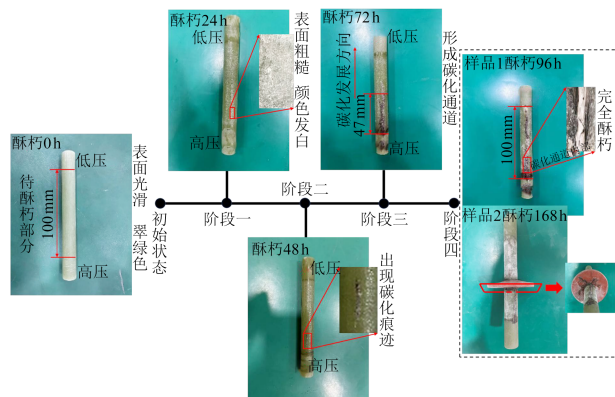
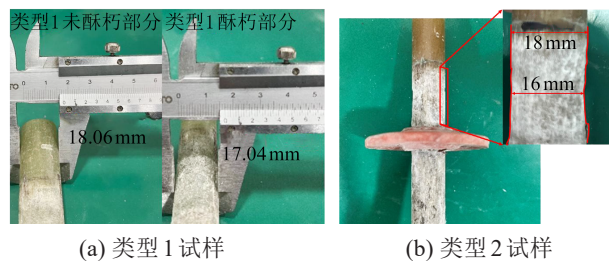


图3 芯棒试样酥朽试验过程及外部特征

Fig.3 Decay-like test process and external characteristics of core rod samples

对比两种类型的试样,在碳化通道处类型1试样的酥朽深度比类型2试样更深,说明类型1试样酥朽沿轴向、径向发展更严重。然而,整体上类型2试样完全酥朽需要的时间更长,且酥朽后的劣化现象更加严重,不同于类型1试样只有碳化通道附近完全酥朽,类型2试样位于高低压电极间的芯棒环面均完全酥朽,且直径变小的现象在类型2试样上更加明显,如图4所示,这说明类型2试样酥朽沿轴向、环向发展程度较高,整体粉化更严重。



(a) 类型1试样 (b) 类型2试样

图4 酥朽试样直径变化

Fig.4 Diameter variation of decay-like samples

实际复合绝缘子酥朽劣化的时间更长、劣化效果更明显,因此在研究复合绝缘子酥朽程度时需考虑酥朽沿轴向、纵向、环向的发展。

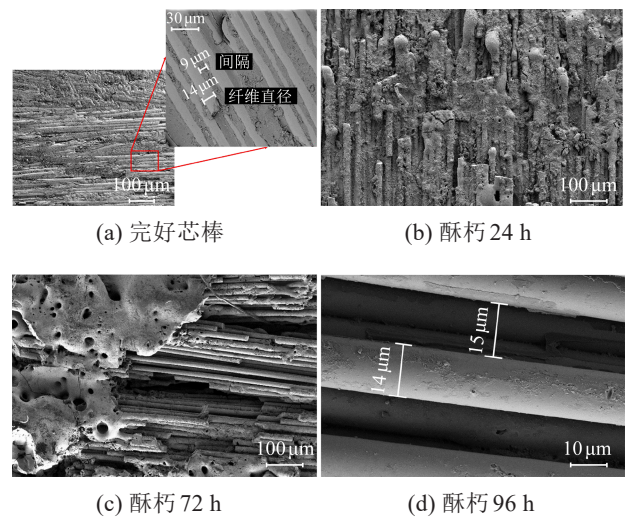
2 试验结果

2.1 酥朽芯棒理化特征

复合绝缘子的物理特性与芯棒的成分及状态密切相关,为进一步分析试样在酥朽前后的特征变化,对各阶段试样进行微观结构及成分分析。

图5为复合绝缘子芯棒试样的SEM观察结果。从图5(a)可以看出,除了因打磨试样导致的表面粗糙,完好芯棒中的玻璃纤维排列紧密,玻璃纤维之间的间隔约为 $9\mu\text{m}$,且缝隙完全由环氧树脂填充固

定。这种结构使得复合绝缘子芯棒具备较高的力学性能,抗拉伸、抗变形能力高。从图5(b)~(c)可以看出,随着酥朽劣化程度的提高,芯棒中环氧树脂开始降解,并附着在玻璃纤维表面。由于树脂-纤维界面部分失效,玻璃纤维排列变得分散且出现断裂、缺失现象。从图5(d)可以看出,在芯棒完全酥朽后,环氧树脂基体完全降解,玻璃纤维间隔变大,由约 $9\mu\text{m}$ 变为约 $15\mu\text{m}$,树脂-纤维界面完全失效。



(a) 完好芯棒 (b) 酥朽 24 h (c) 酥朽 72 h (d) 酥朽 96 h

图5 SEM分析:微观外部特征

Fig.5 SEM analysis: microscopic external characteristics

由于环氧树脂和玻璃纤维的热分解温度存在差异,可以通过热重测试分析芯棒中环氧树脂的含量。图6为复合绝缘子芯棒的热重分析结果。

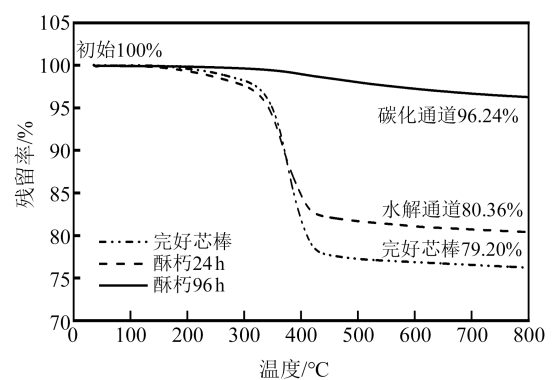


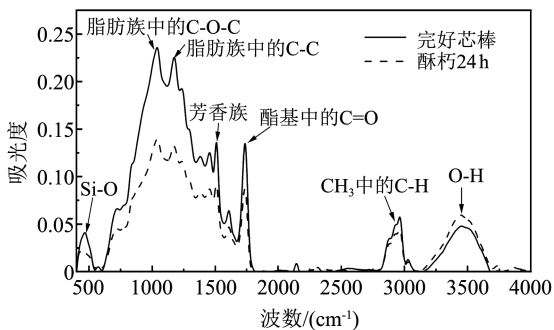
图6 热重分析结果

Fig.6 Thermogravimetric analysis results

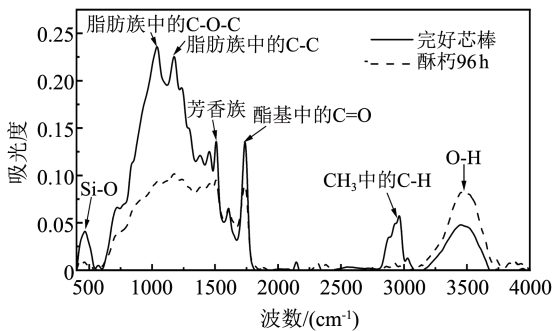
从图6可以看出,未酥朽芯棒的环氧树脂含量占比为20.8%,酥朽24h后的芯棒中环氧树脂含量占比降为19.64%,当芯棒完全酥朽后,环氧树脂含量占比降至3.76%。这说明环氧树脂的含量随着酥朽劣化程度的提高而降低,直至几乎完全降解,与

SEM 观察结果一致。因此芯棒中完全酥朽部分仅剩玻璃纤维发挥力学性能。

对芯棒进行红外光谱分析,结果如图 7 所示。由图 7 可知,对比完好芯棒的红外光谱,酥朽 24 h 和 96 h 芯棒的各类特征官能团的特征峰强度明显降低,说明环氧树脂基体发生降解。同时,酥朽 24 h 和 96 h 芯棒中的 Si-O 特征峰强度也有所降低,说明玻璃纤维在酥朽劣化过程中发生了水解和离子交换现象,且完全酥朽部分的玻璃纤维水解现象更明显。



(a) 酥朽 24 h



(b) 酥朽 96 h

图 7 红外光谱分析

Fig.7 Infrared spectroscopy analysis

在实际工况下,复合绝缘子芯棒在表面受潮和高场强区域局部放电的共同作用下会产生硝酸等酸性介质^[6],酸性介质的腐蚀作用也会导致玻璃纤维的断裂,该过程将加速复合绝缘子的酥朽断裂。

综上所述,由于环氧树脂基体的完全降解以及玻璃纤维的水解、断裂,芯棒中完全酥朽部分发生粉化且基本丧失力学性能,从而导致复合绝缘子整体的力学性能下降。

2.2 酥朽芯棒力学性能

为了探究酥朽劣化对复合绝缘子芯棒力学性能的影响,对酥朽过程中芯棒试样的力学性能进行测试。对不同劣化程度的芯棒试样施加轴向应力,

利用应力与应变的比例关系计算弹性模量以表征芯棒的刚度及变形难易程度,测试结果如图 8 所示。经计算,完好芯棒试样的弹性模量为 63.00 GPa,酥朽 24 h 芯棒试样的弹性模量降低至 58.75 GPa,酥朽 48 h 芯棒试样的弹性模量降低至 56.64 GPa。结果表明,随着酥朽劣化程度的提高,芯棒的弹性模量明显降低,刚度减小,抗形变能力降低。

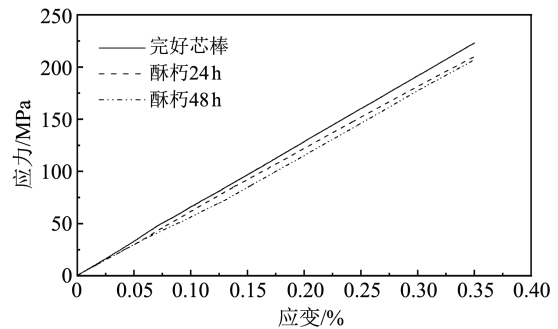


图 8 试样力学性能测试结果

Fig.8 Test results of mechanical properties for the samples

对不同劣化程度的芯棒试样施加纵向应力,利用试样横向应变与纵向应变的比例关系计算泊松比,用以表征芯棒的抗拉伸、抗压缩能力,测试结果如图 9 所示。从图 9 可以看出,完好芯棒的泊松比为 0.19,酥朽 24 h 后芯棒的泊松比变为 0.54,酥朽 48 h 后芯棒的泊松比增大到 0.62。可见劣化程度越高,芯棒的泊松比越大,这说明酥朽劣化后芯棒的抗拉伸能力降低。

芯棒酥朽前后的宏观、微观特性分析及力学性能实测结果表明,芯棒完全酥朽部分中的环氧树脂完全降解,玻璃纤维发生水解导致其断裂粉化,使得完全酥朽部分基本丧失力学性能,致使复合绝缘子的刚度、抗形变能力、抗拉伸能力等力学性能降低。

3 复合绝缘子芯棒振动模态仿真

对于理想化无阻尼系统,其振动方程如式(1)~(2)所示。

$$M\ddot{X} + KX = 0 \quad (1)$$

$$X = \phi \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

式(1)~(2)中: M 为系统的质量; K 为系统刚度; X 为主振动函数; \ddot{X} 为振动加速度函数; φ 为初始相位; ϕ 为振动距离幅值; ω 为特征频率。

为保证振动 X 有非零解,则有式(3)~(4),其中式(4)为式(3)的特征多项式。

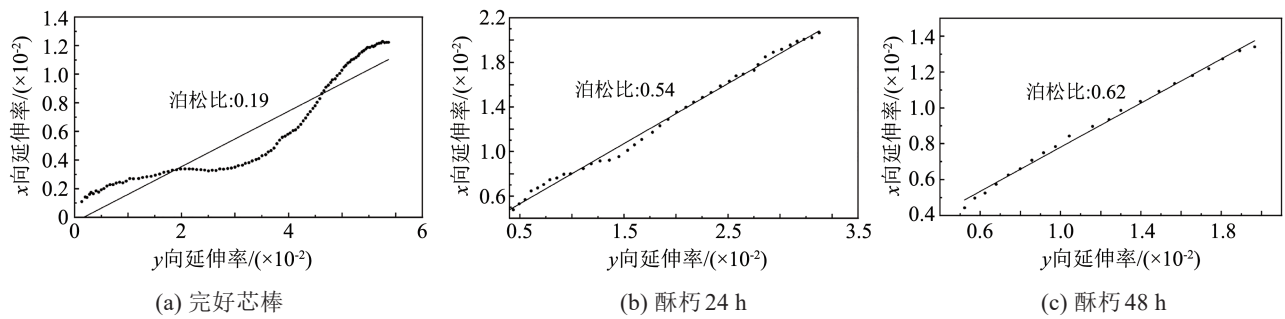


图9 试样泊松比测试结果

Fig.9 Test results of Poisson's ratio for the samples

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (3)$$

$$\omega^{2n} + a_1 \omega^{2(n-1)} + \dots + a_{n-1} \omega^2 + a_n = 0 \quad (4)$$

式(4)中, a_n 表示特征多项式中各阶 ω 的系数。

根据振动方程可知,当芯棒的刚度、质量等参数发生变化时,复合绝缘子系统的振动模态以及特性频率将发生变化。下面将利用振动模态仿真研究复合绝缘子芯棒特征频率随酥朽程度的变化趋势。

3.1 酥朽对特征频率的影响

根据型号为 FXBW4 110/100 的复合绝缘子芯棒建立模型,高度为 1 280 mm,直径为 18 mm,材料的具体参数如表 1 所示。

表 1 复合绝缘子芯棒材料参数

Table 1 Parameters of composite insulator core rod materials

部件	材料	密度/(kg/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比
芯棒	玻璃钢	2 092	6.30×10 ⁴	0.19
金具	铸铁	7 850	2.06×10 ⁵	0.30

根据上节中宏观、微观特性分析结果,将模型中芯棒的部分材料去除以模拟因材料粉化而失去力学性能的酥朽部分,如图 10 所示。分别对完整的芯棒模型以及模拟部分酥朽的芯棒模型进行振动模态仿真,前 4 阶振动模态的特征频率如图 11 所

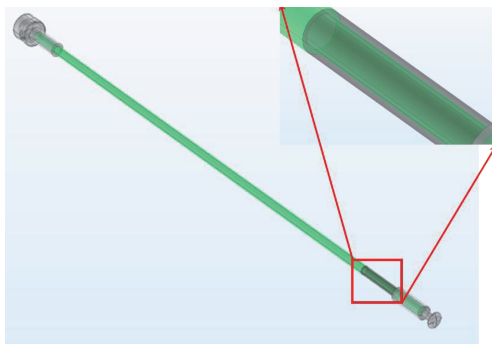


图 10 复合绝缘子芯棒仿真模型

Fig.10 Simulation model of composite insulator core rod

示。从图 11 可以看出,完好芯棒前 4 阶振动模态的特征频率分别为 29.50、98.42、205.63、349.35 Hz;部分酥朽芯棒前 4 阶振动模态的特征频率分别为 29.37、96.21、195.75、324.25 Hz。相比于完好芯棒的特征频率,部分酥朽芯棒模型的特征频率在各阶振动模态中均下降,且振动模态阶数越高,特征频率降低越为明显,即高阶振动模态的特征频率对复合绝缘子的酥朽缺陷感知更敏感。

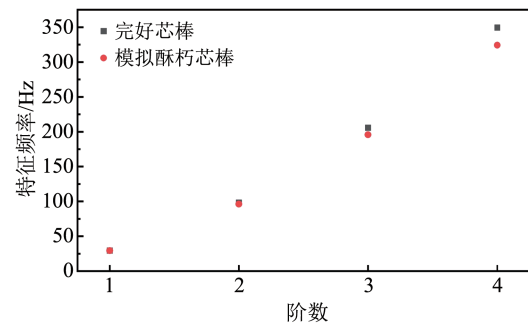


图 11 前 4 阶振动模态特征频率仿真结果

Fig.11 Simulation results of the first four order vibration mode characteristic frequencies

3.2 特征频率随酥朽程度变化规律

3.2.1 酥朽沿轴向发展

保持酥朽径向深度 r 为 2 mm,分别对酥朽轴向长度 d 为 0~125 mm(间隔为 25 mm)的复合绝缘子芯棒进行振动模态分析,缺陷模型示意图如图 12 所示。仿真得到前 4 阶振动模态的特征频率如图 13 所示。

从图 13 可以看出,当酥朽沿轴向发展时,复合绝缘子芯棒前 4 阶振动模态的特征频率均随之下降。当酥朽长度发展到 125 mm 时,前 4 阶振动模态的特征频率分别比轴向长度为 0 mm 时下降了 0.390、4.597、15.880、30.510 Hz,其中 4 阶振动模态的特征频率下降最明显。

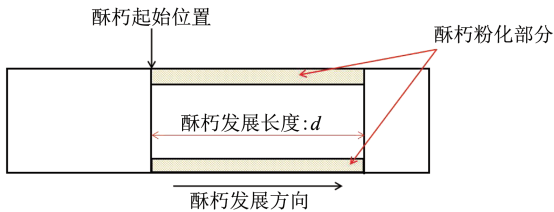
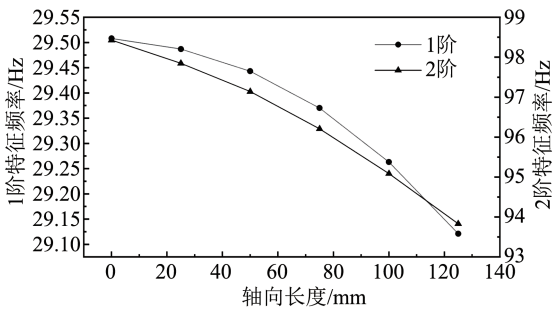
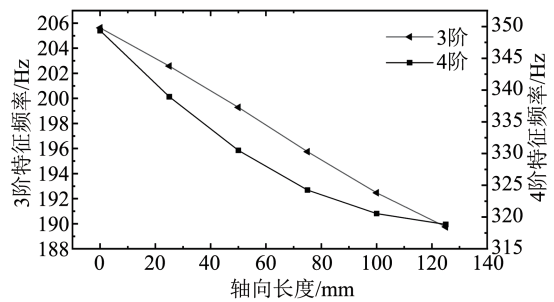


图 12 酥朽沿轴向发展模型示意图

Fig.12 Model schematic diagram of axial development for decay-like



(a) 1、2阶特征频率



(b) 3、4阶特征频率

图 13 前 4 阶振动模态特征频率仿真结果

Fig.13 Simulation results of the first four order vibration mode characteristic frequencies

3.2.2 酥朽沿径向发展

保持酥朽轴向长度 d 为 75 mm, 分别对酥朽径向深度 r 为 0~5 mm (间隔为 1 mm) 的复合绝缘子芯棒进行振动模态分析, 缺陷模型示意图如图 14 所示。仿真得到前 4 阶振动模态的特征频率如图 15 所示。

从图 15 可以看出, 与酥朽沿轴向发展时的变化规律相似, 当酥朽沿径向发展时, 复合绝缘子芯棒

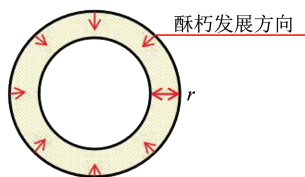
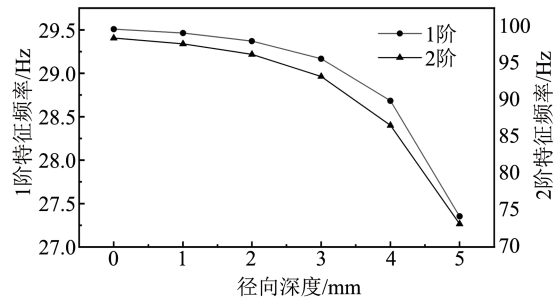


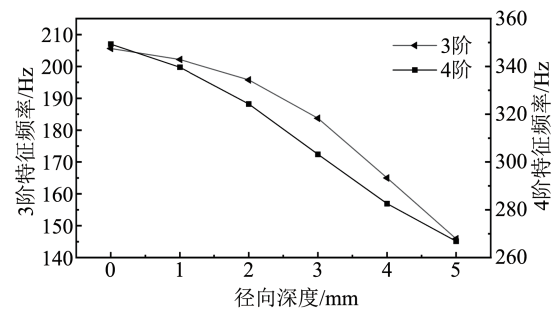
图 14 酥朽沿径向发展模型示意图

Fig.14 Model schematic diagram of radial development for decay-like

前 4 阶振动模态的特征频率不断下降。当酥朽深度发展到 5 mm 时, 前 4 阶振动模态的特征频率比径向深度为 0 mm 时分别下降了 2.155、25.284、59.740、82.510 Hz。



(a) 1、2阶特征频率



(b) 3、4阶特征频率

图 15 前 4 阶振动模态特征频率仿真结果

Fig.15 Simulation results of the first four order vibration mode characteristic frequencies

3.2.3 酥朽沿环向发展

设置酥朽轴向长度为 75 mm、径向深度为 2 mm, 改变酥朽区域的环向角度为 $0^\circ \sim 360^\circ$ (间隔为 60°), 缺陷模型示意图如图 16 所示。仿真得到前 4 阶振动模态的特征频率如图 17 所示。

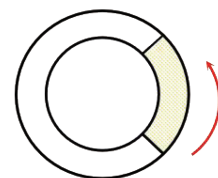


图 16 酥朽沿环向发展模型示意图

Fig.16 Model schematic diagram of circumferential development for decay-like

从图 17 可以看出, 随着酥朽区域环向角度的增大, 复合绝缘子芯棒前 4 阶振动模态的特征频率随之下降, 当酥朽环向角度发展到 360° , 前 4 阶振动模态的特征频率比环向角度为 0° 时分别下降了 0.138、2.221、9.880、25.100 Hz。

综上所述, 复合绝缘子各阶振动模态对应的特

征频率均会随着酥朽区域的扩大而下降,且高阶振动模态的特征频率下降幅度最为明显。因此,可以通过复合绝缘子高阶振动模态特征频率的降幅来反映其酥朽劣化程度。

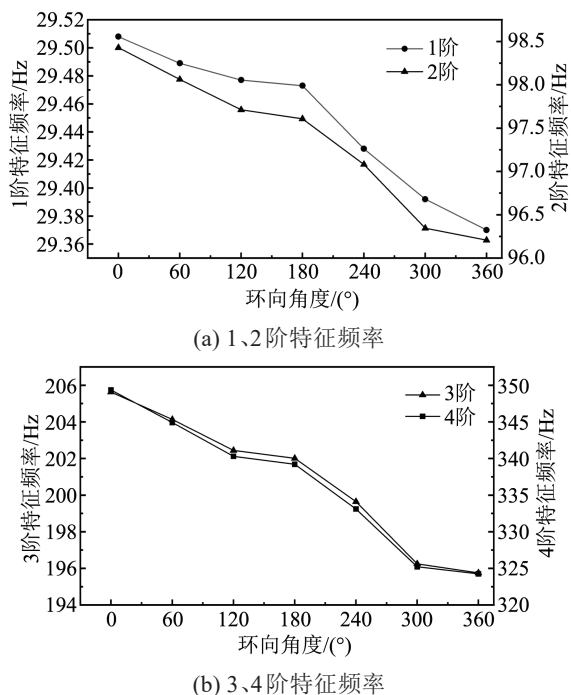


图 17 前 4 阶振动模态特征频率仿真结果

Fig.17 Simulation results of the first four order vibration mode characteristic frequencies

4 酥朽缺陷诊断测试

4.1 测试方法

4.1.1 振动激励方法及信号采集位置

利用单点锤击法检测复合绝缘子的振动模态,搭建了如图 18 所示的振动模态检测平台,其中激励作用位置以及振动信号采集位置有高压端铸铁、低压端铸铁两处。激励位置和信号采集位置的不同将会影响模态参数的测量效果。同时,施加激励时采用的力锤锤头一般有 304 钢、树脂、橡胶 3 种材

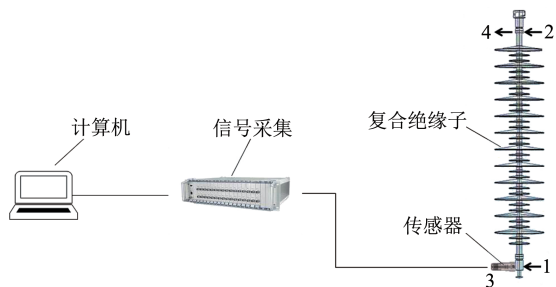


图 18 振动模态检测平台

Fig.18 Vibration mode detection platform

质,不同材质的锤头对复合绝缘子各阶振动模态的激励效果也存在差异。因此,为了尽可能地激发高阶振动模态并确保模态参数的测量效果,需要选择最优的锤头材质、激励位置以及信号采集位置。

分别采用 304 钢、树脂、橡胶材质的锤头激励完好复合绝缘子的 1、2 号点位,3、4 号点位的信号采集分析结果如图 19 所示。从图 19 可以看出,虽然金属和橡胶材质的锤头对低阶振动模态的激励效果较好,但对高阶振动模态的激励效果不理想。而树脂材质的锤头在保证低阶振动模态激励效果的同时,对高阶振动模态的激励也较有效,因此锤头材质选取树脂。

对比 4 种激励-信号采集位置下的分析结果发现,在 1 号点位施加激励,4 号点位采集的信号中包含的高阶振动模态特征频率更明显。因此,激励及信号采集位置分别选择为 1 号、4 号位。

4.1.2 初始特征频率一致性验证

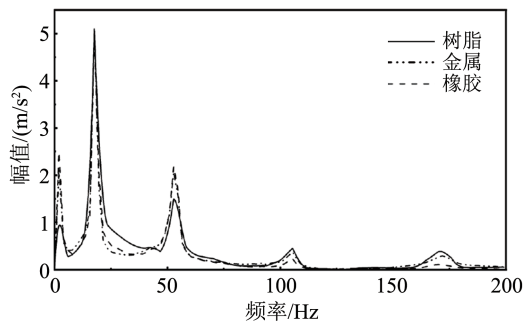
由于生产批次的不同,同型号复合绝缘子的制作工艺存在差异,可能影响其特征频率的数值。为了保证检测方法的可信性,需要验证同型号复合绝缘子各阶振动模态特征频率的一致性,确保不同批次复合绝缘子的特征频率偏差在误差范围内。

分别对国内某厂家在 2023 年 2、4、6、7 月生产的 110 kV 复合绝缘子进行实测,得到前 5 阶振动模态对应的特征频率如表 2 所示。从表 2 可以看出,4 个批次复合绝缘子各阶振动模态的特征频率相差不大,说明同型号复合绝缘子各阶振动模态的特征频率具有一致性。因此,研究复合绝缘子特征频率与酥朽的关联关系并利用该特征进行酥朽诊断是可行的。

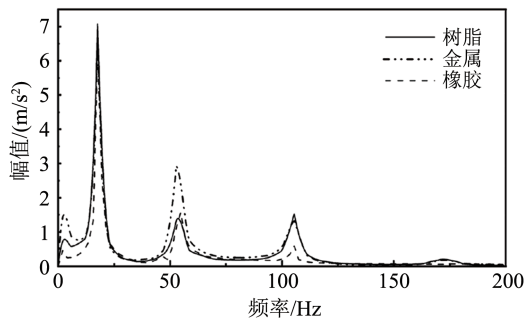
4.1.3 酥朽试样制备

为了满足研究需求,需要制备多根存在酥朽缺陷的复合绝缘子试样。本研究以现场试样和第一节分析结果为依据,对同厂家同批次的复合绝缘子进行模拟酥朽处理。复合绝缘子在受到长时间载荷影响后,芯棒表面环氧树脂基体以及玻璃纤维会破损脱落^[22],因此为了模拟复合绝缘子受交变载荷的影响,暂时剥离橡胶护套并对芯棒进行打磨处理。采用图 1 所示的酥朽平台,对处理后的芯棒进行模拟酥朽实验。处理过程如图 20 所示。

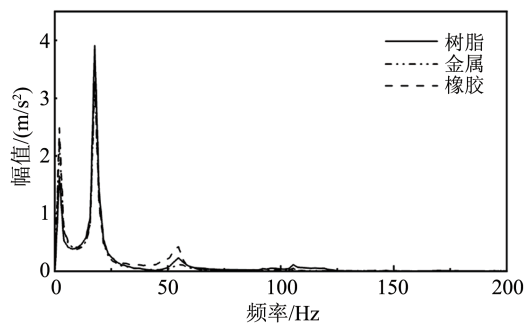
在开展实测前,需要排除橡胶护套处理过程对复合绝缘子振动模态特征频率的影响,为此分别对未处理的复合绝缘子以及处理但未酥朽的复合绝



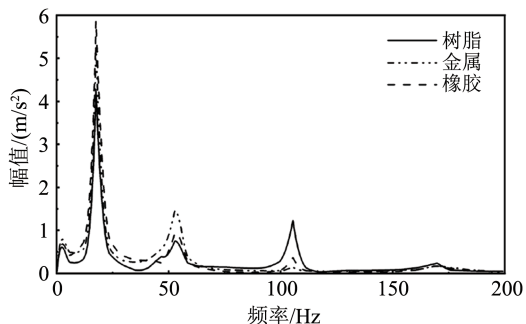
(a) 1号激励, 4号采集



(b) 1号激励, 3号采集



(c) 2号激励, 4号采集



(d) 2号激励, 3号采集

图19 不同激励、信号采集位置以及锤头下采集分析结果
Fig.19 Acquisition analysis results of different incentives, signal acquisition positions, and hammer

缘子进行检测,特征频率分析结果如图21所示。从图21可以看出,处理后复合绝缘子的5阶振动模态特征频率比未处理的高1.553 Hz,此偏差在可接受范围内。说明橡胶护套处理过程对复合绝缘子特征频率的影响较小,可忽略不计。

表2 不同批次的复合绝缘子特征频率测试结果

Table 2 Test results of characteristic frequencies of composite insulators from different batches

	Hz				
生产时间	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶
2023.02	1.953	17.578	54.688	105.469	171.875
2023.04	1.953	17.578	55.734	104.282	169.922
2023.06	1.953	17.578	52.734	105.469	169.922
2023.07	1.953	17.578	53.711	105.469	170.898

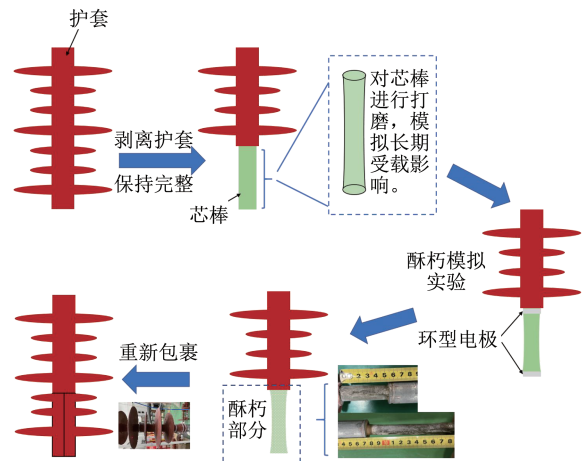


图20 酥朽试样处理过程

Fig.20 Treating process of decay-like samples

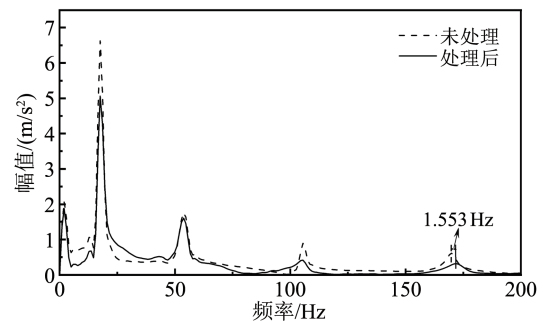


图21 完好试样的特征频率在护套处理前后的对比
Fig.21 Comparison of characteristic frequencies of intact samples before and after treating sheath

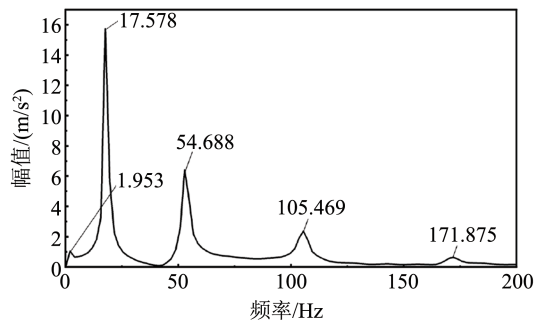
4.2 酥朽程度与特征频率关联实测

将同批次同型号的复合绝缘子制作为酥朽区域如表3所示的酥朽试样,采用单点锤击法(锤击高压端铸铁、采集低压端铸铁振动信号)对酥朽试样的振动模态特征频率进行实测,测量结果如图22所示。

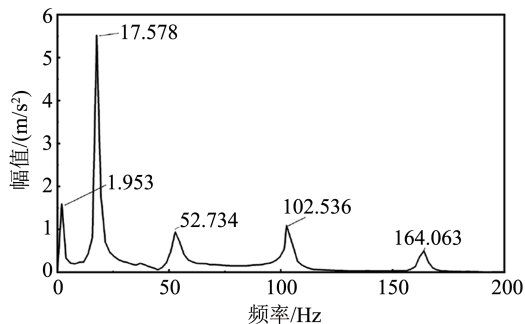
从图22可以看出,完好复合绝缘子的前5阶振动模态特征频率分别为1.953、17.578、54.688、105.469、171.875 Hz。对比完好复合绝缘子,3种酥朽试样的1、2阶振动模态特征频率偏差很小,3阶振

表3 试样酥朽程度及参数

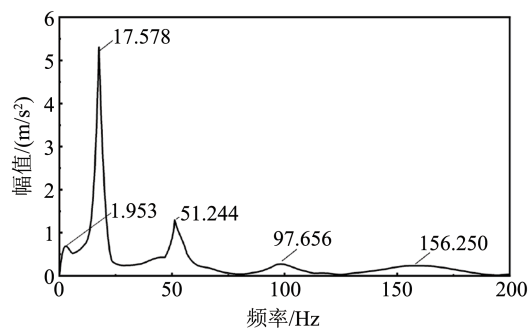
试样酥朽程度	酥朽深度/mm	酥朽长度/mm
轻度	1	50
中度	2	100
严重	3	150



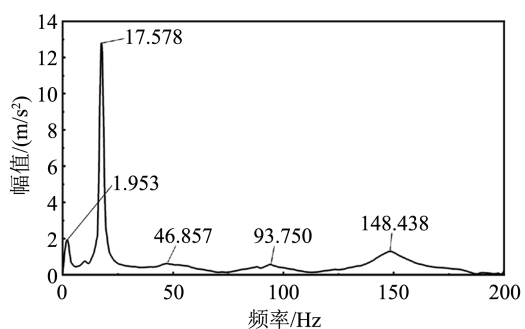
(a) 完好试样



(b) 轻度酥朽



(c) 中度酥朽



(d) 严重酥朽

图22 试样实测结果

Fig.22 Measured results of the samples

动模态的特征频率随着酥朽程度的增加分别下降了3.6%、6.3%、14.3%，4阶振动模态的特征频率分别下降了2.8%、7.4%、11.1%，5阶振动模态的特征频率分别下降了4.5%、9.1%、13.6%。针对3~5阶振动模态特征频率，轻度酥朽的复合绝缘子降低了0%~5%，中度酥朽的复合绝缘子降低了5%~10%，严重酥朽的复合绝缘子降低了10%以上。后续可以利用特征频率-酥朽程度关联数据库进行酥朽程度诊断。

由前文可知，复合绝缘子振动模态的特征频率(ω)也是反映复合绝缘子力学性能的物理量，与绝缘子的刚度(K)和质量(M)相关，具体表达式如式(5)所示。

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{M}} / (2\pi) \quad (5)$$

当存在酥朽缺陷时，复合绝缘子的质量将降低，因此，复合绝缘子振动模态特征频率的下降可以反映出刚度的降低，即力学性能的降低。

5 结论

(1)通过对复合绝缘子芯棒试样在酥朽前后的特征分析，明确了芯棒酥朽缺陷沿轴向、径向、环向的发展区域；宏观及微观的观察结果表明，芯棒酥朽部分的环氧树脂基体降解和玻璃纤维水解、粉化使其基本丧失力学性能，导致芯棒整体力学性能降低；对芯棒试样的弹性模量以及泊松比进行实测，酥朽后芯棒的弹性模量降低、泊松比增大，表明芯棒刚度、抗形变能力、抗拉伸能力降低。

(2)通过对酥朽复合绝缘子进行振动模态仿真分析，明确了复合绝缘子振动模态特征频率与酥朽程度的关联关系：复合绝缘子酥朽程度越严重，其各阶振动模态对应的特征频率越低，且高阶振动模态的特征频率对酥朽程度的感知更敏感。

(3)对复合绝缘子酥朽试样进行实测分析，发现对比完好复合绝缘子，轻度酥朽的复合绝缘子的3~5阶振动模态特征频率下降了2.8%~4.5%，中度酥朽复合绝缘子的3~5阶振动模态特征频率下降了6.3%~9.1%，严重酥朽复合绝缘子的3~5阶振动模态特征频率下降了10%以上。表明本研究提出的基于振动模态的酥朽检测方法可以对复合绝缘子的酥朽程度进行诊断，同时可以反映其力学性能变化。

参考文献 References

- [1] 王欣欣,赵博,何成,等. 跨高铁输电线路复合绝缘子伞裙抗风性能研究[J]. 电瓷避雷器,2021(3):194-199.
WANG Xinxin, ZHAO Bo, HE Cheng, et al. Wind resistance performance of composite insulator shed for transmission lines across high-speed railway[J]. Insulators and Surge Arresters,2021(3):194-199.
- [2] 崔江流,宿志一,易辉,等. 我国硅橡胶合成绝缘子的应用与展望[J]. 中国电力,1999(1):40-43.
CUI Jiangliu, SU Zhiyi, YI Hui, et al. The application and its prospect of silicon rubber composite insulators in China[J]. Electric Power,1999(1):40-43.
- [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.
- [4] 铁道科学院供电研究室,清华大学高电压教研室. 合成绝缘子机电性能的研究[J]. 高电压技术,1983,9(4):26-32.
China Academy of Railway Sciences, High Voltage Teaching and Research Office of Tsinghua University. Research on the mechanical and electrical performance of composite insulators[J]. High Voltage Engineering,1983,9(4):26-32.
- [5] 卢明,刘泽辉,高超,等. 国内输电线路复合绝缘子典型故障情况调查及原因分析[J]. 电瓷避雷器,2022(4):214-220.
LU Ming, LIU Zehui, GAO Chao, et al. Investigation on typical fault of composite insulator in domestic transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters,2022(4):214-220.
- [6] 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):4778-4786.
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):4778-4786.
- [7] 卢明,高超,吴焱松,等. 复合绝缘子脆性断裂与酥朽断裂差异性研究[J]. 高压电器,2022,58(6):17-23.
LU Ming, GAO Chao, WU Yansong, et al. Study on difference between brittle fracture and decay-like fracture of composite insulator[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(6):17-23.
- [8] 宋伟,赵林杰,李成榕,等. 复合绝缘子在线检测技术的发展[J]. 高电压技术,2005,31(5):28-30.
SONG Wei, ZHAO Linjie, LI Chengrong, et al. Online detection methods of composite insulator[J]. High Voltage Engineering,2005,31(5):28-30.
- [9] 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.
- [10] 迟殿林,曾庆立,孙立时. 用紫外成像检测绝缘子[J]. 高电压技术,2006,32(2):115-116.
CHI Dianlin, ZENG Qingli, SUN Lishi. Detecting insulator by UV imaging[J]. High Voltage Engineering,2006,32(2):115-116.
- [11] 梁进祥,徐偲达,张虎. 高压输电线路复合绝缘子硅橡胶内部缺陷超声检测[J]. 绝缘材料,2024,57(1):68-73.
LIANG Jinxiang, XU Sida, ZHANG Hu. Ultrasonic testing of internal defects of composite insulator silicone rubber for high voltage transmission lines[J]. Insulating Materials,2024,57(1):68-73.
- [12] 曹雯,栾明杰,申巍,等. 绝缘子芯棒碳化对其电场分布特性的影响[J]. 电机与控制学报,2018,22(11):89-95.
CAO Wen, LUAN Mingjie, SHEN Wei, et al. Effects of carbonization of insulator core rod on properties of electric field distribution[J]. Electric Machines and Control,2018,22(11):89-95.
- [13] 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. Reason analysis of decay-like aging for composite insulator[J]. Power System Technology,2018,42(4):1335-1341.
- [14] 卢明,高超,张世尧,等. 复合绝缘子早期酥朽故障诊断及异常发热机理研究[J]. 电瓷避雷器,2022(2):205-212.
LU Ming, GAO Chao, ZHANG Shiyao, et al. Early decay-like aging diagnosis and mechanism of abnormal temperature rise of composite insulators[J]. Insulators and Surge Arresters,2022(2):205-212.
- [15] 王黎明,付铠玮,梅红伟,等. 环境湿度对复合绝缘子红外测温的影响[J]. 高电压技术,2019,45(6):1955-1961.
WANG Liming, FU Kaiwei, MEI Hongwei, et al. Influence of environmental humidity on infrared measurement temperature of composite insulators[J]. High Voltage Engineering,2019,45(6):1955-1961.
- [16] 全国高电压试验技术标准化技术委员会. 带电设备红外诊断应用规范:DL/T 664—2016[S]. 北京:中国电力出版社,2016.
National Standardization Technical Committee for High Voltage Testing Technology. Infrared diagnostic specification for live equipment: DL/T 664—2016[S]. Beijing: China Electric Power Press,2016.
- [17] 高芳清,金建明,高淑英. 基于模态分析的结构损伤检测方法研究[J]. 西南交通大学学报,1998,43(1):110-115.
GAO Fangqing, JIN Jianming, GAO Shuying, et al. Research on structural damage detection method based on modal analysis[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,1998,43(1):110-115.
- [18] 万小朋,王军强,赵美英. 基于模态频率和神经网络的结构损伤检测[J]. 西北工业大学学报,2003,21(2):156-159.
WAN Xiaopeng, WANG Junqiang, ZHAO Meiyong. Structural damage detection based on modal frequency and neural network[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University,2003,21(2):156-159.

- (2):156-159.
- [19] 刘文光,郭隆清,贺红林,等.基于固有频率的呼吸式裂纹梁损伤识别方法[J].中国机械工程,2017,28(6):702-707,713.
LIU Wenguang, GUO Longqing, HE Honglin, et al. A damage identification method of a breathing cracked beam by natural frequency[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(6): 702-707,713.
- [20] 陈重洪,庄建煌,林俊超,等.瓷支柱绝缘子带电状态检测系统的研制[J].高压电器,2020,56(7):212-217.
CHEN Chonghong, ZHUANG Jianhuang, LIN Junchao, et al. Development of live detection system for porcelain post insulator[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(7):212-217.
- [21] 刘建屏,臧春艳,韩腾,等.基于振动模态分析的高压瓷套无损检测研究[J].高压电器,2017,53(11):122-126.
LIU Jianping, ZANG Chunyan, HAN Teng, et al. Research on the nondestructive detection of high voltage porcelain bushing based on vibration modal analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2017,53(11):122-126.
- [22] 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,2023.
ZHONG Zheng. Research on the mechanism and temperature rise characteristics of crunchy deterioration of composite insulator core rods in high humidity environment[D]. Beijing, China: North China Electric Power University,2023.

收稿日期:2024-04-05;修回日期:2024-05-20。

作者简介:

刘志超(2000-),男(汉族),河北衡水人,硕士生,主要从事高压设备局部放电检测与诊断的研究;

通信作者:郑书生(1979-),男(汉族),山西晋城人,正高级实验师,博士,主要从事高电压与绝缘技术、电气设备绝缘在线监测的研究。