

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.09.001

高压开关与GIS/GIL设备技术

GIS/GIL 绝缘件潜隐性缺陷形成机理与无损检测技术研究进展

贺 春¹, 何 金¹, 赵思源¹, 杨志超², 陈 允², 段晓辉³,
段启超³, 王 宁³, 夏 慧⁴, 李 进⁵

(1. 国网天津市电力公司, 天津 300010; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 3. 河南平高电气股份有限公司, 河南 平顶山 467000; 4. 中国科学研究院电工研究所, 北京 100190; 5. 天津大学智能配用电装备与系统
全国重点实验室, 天津 300072)

摘要: 气体绝缘组合电器(GIS)与气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)中的环氧树脂绝缘件(盆式绝缘子、支柱绝缘子等)是设备的核心部件,其长期运行可靠性面临严峻挑战。生产阶段形成的潜隐性缺陷(浅表性缺陷、界面缺陷及残余应力缺陷)是导致绝缘件开裂、击穿甚至炸裂故障的主要原因,而传统出厂试验(耐压局放、X射线、水压试验)对此类缺陷的检测能力严重不足。文中系统综述了上述3类潜隐性缺陷的形成机理,分析了气泡成核、填料沉降及界面应力失配等关键诱因;评述了太赫兹时域光谱、激光超声及声弹效应等新型无损检测技术的原理、适用性及工程化瓶颈。研究表明,现有检测技术存在明显盲区,新型检测方法虽具潜力但尚需突破检测效率、穿透深度及复杂结构适应性等难题,未来应围绕“机理厘清—检测突破—抑制优化”主线开展系统研究,为提升绝缘件制造质量与设备本质安全提供理论支撑与技术路径。

关键词: 气体绝缘组合电器/气体绝缘金属封闭输电线路;盆式绝缘子;潜隐性缺陷;无损检测

Research Progress on Formation Mechanisms of Latent Defects and Non-destructive Testing Techniques for GIS/GIL Insulators

HE Chun¹, HE Jin¹, ZHAO Siyuan¹, YANG Zhichao², CHEN Yun², DUAN Xiaohui³,
DUAN Qichao³, WANG Ning³, XIA Hui⁴, LI Jin⁵

(1. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467000, China; 4. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 5. State Key Laboratory of Smart Power Distribution Equipment and System, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Epoxy resin insulating parts (insulating spacers, post insulators, etc.) in gas insulated switchgear (GIS) and gas insulated transmission lines (GIL) are critical core parts of the equipment, and their long-term operational reliability faces severe challenges. Latent defects formed during the manufacturing stage (such as superficial defects, interface defects, and residual stress defects) are the main causes causing cracking, breakdown, and even rupture of insulating parts. While, the conventional factory tests, including withstand voltage partial discharge test, X-ray inspection, and hydrostatic pressure test, are severely inadequate in detecting such defects. In this paper the formation mechanisms of these three types of latent defects are systematically reviewed, with emphasis placed in the key inducing factors such as bubble nucleation, filler sedimentation, and interfacial stress mismatch. Moreover, the principles, applicability, and engineering bottlenecks of such novel non-destructive testing techniques as terahertz time-domain spectroscopy, laser ultrasound, and the acoustoelastic effect are reviewed. The research indicates that existing detection techniques have significant blind spots. Although emerging detection methods show potential, they still face challenges in terms of detection efficiency, penetration depth, and adaptability to complex structures. Future efforts should be directed toward systematic research along the main line of “mechanism clarification - detection break-

收稿日期:2026-04-12; 修回日期:2026-05-21

基金项目:国家电网公司科技项目(52039925000C-101-ZN)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(52039925000C-101-ZN).

through-inhibition optimization”, so as to provide theoretical support and technical pathways for improving the manufacturing quality of insulation components and the intrinsic safety of equipment.

Key words: GIS/GIL; insulating spacer; latent defects; nondestructive detection

0 引言

气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)与气体绝缘组合电器(GIS)作为构建现代高压与超高压电力主干网的核心装备,凭借占地面积小、可靠性高、安全性强及运维工作量小等突出优势,在电力系统中得到广泛应用,其长期运行可靠性直接关系到电网的安全稳定与能源的持续供应^[1]。相关研究指出,随着新型电力系统建设提速,GIS/GIL设备绝缘失效风险显著提升,其中环氧树脂绝缘件缺陷是主要诱因之一^[2]。与此同时,随着藏东南水电等规模化清洁能源基地的开发与新型电力系统建设的持续推进,GIS/GIL设备正面临更为严苛的极端运行环境,对设备核心部件的性能要求愈发严苛^[3]。作为设备核心支撑部件的环氧树脂绝缘件,其性能优劣直接决定了GIS/GIL设备的运行可靠性,由此成为当前研究的重点关注对象^[4]。

环氧树脂绝缘件(如盆式绝缘子、支柱绝缘子、绝缘拉杆等)作为GIS/GIL的核心组成部分,承担着电气绝缘、机械支撑及气室隔离等关键功能,其成本高、用量大,直接制约着GIS/GIL设备的运行安全与可靠性^[5]。然而,当前绝缘件生产厂家工艺水平参差不齐,加之有效的缺陷检测手段不足,现场因绝缘件质量问题导致的故障时有发生^[6]。据国网公司近10年330 kV及以上GIS故障统计数据显示,由绝缘件质量引起的故障占比超过23%^[7]。尤其近3年来,超/特高压换流站、变电站工程中频繁出现绝缘件开裂、沿面击穿甚至炸裂等故障,严重影响工程投运进度及系统运行稳定性^[8]。

深入分析表明,环氧树脂绝缘件在生产阶段形成的潜隐性缺陷(主要包括浅表性缺陷、界面缺陷及残余应力缺陷)是引发上述故障的核心原因。浅表性缺陷是指分布于GIS/GIL绝缘件近表层区域,视检不可见且埋深通常处于 μm 至 mm 量级的局部结构异常,此类缺陷尺寸小、厚度方向投影弱,在X光、工业CT等射线检测中易出现对比度不足、边界模糊或漏检;相关研究发现,浅表性气隙缺陷在电场作用下易发生局部放电,逐步发展为贯穿性缺陷,危及设备安全^[9]。其中,浅表性缺陷多集中于绝缘件表层数 mm 以内,主要表现为气隙、埋藏杂质等,在长时运行工况下易引发表面击穿^[10];界面缺陷源于

铝合金金属嵌件与环氧树脂混合料固化过程中的工艺控制不当,可能导致绝缘击穿或密封失效^[11];残余应力缺陷则由结构设计不合理或固化工艺不良导致,在冷热交变或外部应力作用下易引发开裂^[12]。然而,现有绝缘件出厂试验采用的耐压局放、X射线等传统检测技术,对这类潜隐性缺陷的检测能力严重不足,存在明显检测盲区,同时潜隐性缺陷与工艺参数的关联机制尚未厘清,现有工艺体系难以满足高质量绝缘件的成型要求,导致大量带缺陷绝缘件带病投运,给电网安全运行带来重大隐患^[13]。

在此背景下,开展GIS/GIL绝缘件潜隐性缺陷的无损检测与防治技术研究具有重要的理论价值与工程意义。从理论层面,厘清潜隐性缺陷的形成机理与演化规律,建立缺陷与工艺参数的定量关联模型,可为绝缘件生产优化与缺陷检测提供科学的理论指导。从工程应用层面,开发针对性的高效无损检测技术与缺陷抑制工艺,能够大幅提高潜隐性缺陷的检出率,从源头提升绝缘件制造质量,有效治理环氧树脂绝缘件故障多发问题,降低现场故障概率,提升设备本质安全^[14]。此外,还将有助于推动绝缘件制造行业整体技术水平提升,形成系列技术标准,增强中国在高端电力装备领域的核心竞争力,同时减少非计划停电概率,保障社会稳定发展,提升电网企业支撑社会稳定、保障民生的正面形象。

1 国内外研究现状

国内外学者针对GIS/GIL绝缘件潜隐性缺陷的形成机理、检测技术及抑制方法开展了大量研究,形成了较为丰富的研究成果。

1.1 潜隐性缺陷形成机理研究

GIS/GIL绝缘件的设计制造过程是一个多物理场耦合过程,涉及固体力学、热学与化学反应动力学等方面。在真空浇注与固化成型关键阶段,受树脂混合料的流体特性、固化放热反应以及多相材料属性差异的综合影响,绝缘件内部或表面易引入潜隐性缺陷,此类缺陷难以通过常规检测手段检出。依据缺陷的空间分布位置与物理形态,其形成机制可主要归纳为3大类,即浅表性气泡与杂质的运动演化、界面应力失配及填料沉降诱导的残余应力集中,一些缺陷见图1。

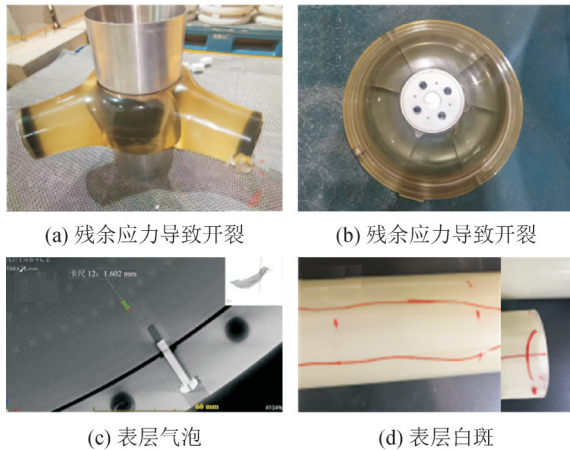


图1 缺陷实物图

Fig. 1 Representative photographs of physical defects

绝缘件的浅表性缺陷主要包括气泡、杂质等类型,其形成与真空浇注、配料及模具装配等工艺环节密切相关。在真空浇注过程中,环氧树脂基体内部气泡的形成主要源于机械夹杂与气体成核两种途径。一方面,在树脂与固化剂的机械混合阶段,若搅拌工艺参数不合理、流道内出现压力骤降等异常情况,气泡易被卷入高黏度树脂体系中^[15-18]。另一方面,真空环境会显著强化树脂内部的气体成核效应,根据成核机理的差异,可分为均相成核与异相成核两种形式。其中,均相成核由树脂内部溶解的挥发性组分(如水分)通过扩散、聚集过程产生^[19];异相成核则是在模具壁、金属嵌件等液-固界面处,借助物理冲击等外部刺激引发,且在实际浇注体系中,异相成核现象更为普遍。气泡形成后,在外部温度场与真空压力的协同作用下,树脂内部挥发成分的迁移与气体扩散成为气泡生长、融合的主要驱动力^[20]。进入高温固化阶段后,随着交联反应的持续进行,树脂体系黏度增加^[21],此时微气泡无法及时排出,便滞留于绝缘件内部,最终形成气泡缺陷。

浅表杂质缺陷的引入则主要发生在配料与模具装配环节,由于金属嵌件表面附着灰尘、浇注设备内部环境受到污染等因素,杂质易混入树脂体系中,并在模腔流场与重力的共同作用下,滞留于绝缘件近表面区域,形成杂质缺陷^[22]。气泡与杂质缺陷会破坏绝缘介质的连续性,在设备工况高压作用下,易引发强烈的局部电场畸变,进而诱发局部放电现象,最终导致GIS设备绝缘性能劣化^[23]。

界面缺陷的形成主要源于多材料体系的界面应力失配和粘接失效,且多发生在环氧树脂基体与金属嵌件(如中心导体、屏蔽环)的结合界面处。由于环氧树脂基体与金属嵌件的热膨胀系数存在显著差异,在高温固化及后续冷却过程中,界面区域

会逐渐积累应力^[24]。从微观界面作用机制看,Ohsako等人基于量子化学模型研究了铝/环氧树脂界面的粘附机制,指出铝表面羟基与环氧树脂之间的氢键作用是界面粘接的重要来源^[25],而有限元仿真结果表明,盆式绝缘子受硬度更高的中心嵌件和屏蔽环的约束作用,其附近区域会出现明显的应力集中现象,且应力积累量随与中心区域距离的减小而增大^[26]。当局部应力超过界面结合强度时,便会引发气隙等界面缺陷,此类缺陷在较低电压作用下即可引发放电^[27]。另外,从微观分子动力学的角度来看,老化过程会削弱界面处的化学键,使环氧树脂的表面裂纹增多,与金属之间的附着力下降,从而形成界面缺陷^[28-29]。

除了上述两类缺陷,残余应力集中是近年来被学术界重点关注的另一类缺陷。Kamal等人较早建立了热固性树脂固化动力学模型,为利用DSC(差示扫描量热法)表征固化反应速率、放热过程和固化度演化提供了基础方法^[30]。在此基础上,White等人提出了复合材料固化过程中残余应力发展的过程模型,将化学收缩、热应变和线性粘弹性行为纳入统一分析框架,用于预测固化过程中残余应力随时间和固化度的演化^[31];Bogetti等人则针对厚壁热固性复合材料,建立了一维固化传热分析与增量层合板理论相耦合的模型,揭示了温度梯度、固化度梯度、树脂收缩和构件厚度对过程诱导残余应力与变形的影响^[32]。这些研究为理解GIS/GIL厚壁环氧绝缘件中残余应力的形成提供了重要理论基础。通过构建固化过程的粘弹性本构方程发现,化学收缩率与绝缘件结构厚度是决定残余应力积累量级与分布规律的主导因素^[33]。除树脂自身的化学收缩外,填料沉降引发的材料非均匀性会进一步加剧应力集中现象。在凝胶前期的数小时内,微米级氧化铝填料发生缓慢沉降,并沿重力方向呈现出明显的阶梯分布,导致绝缘件出现密度分层,进而使材料的弹性模量和热膨胀系数表现出功能梯度特性^[34]。Smoleń等针对环氧树脂中粉体填料沉降过程开展了数学建模与实验验证,指出可利用修正Stokes定律描述粉体填料在环氧树脂中的沉降行为,并通过SEM(扫描电子显微镜)等材料分析方法定量分析填料空间分布^[35];研究同时表明,树脂低黏度和较长凝胶时间会加剧填料沉降,而适量胶体二氧化硅可用于抑制沉降^[36]。在冷却收缩过程中,高密度、高刚度区域受到更强的物理约束,从而在绝缘件内部形成非均匀残余应力场^[37]。这种由沉降效应诱导的结构性应力集中,会将最大拉应力点从几何中心推向填

料富集的界面区域^[38],不仅会降低绝缘件的机械断裂韧性,还会显著增加其在运输或长时运行中发生自发性开裂的隐患^[39]。

1.2 无损检测技术研究

1.2.1 传统检测方法

传统检测方法中,工频局放检测、X射线探伤及水压等机械试验是出厂例行检测的核心手段,在实际应用中虽发挥了重要作用,但受技术原理、设备性能及检测场景等因素限制,仍存在显著优化空间与局限性。

1)工频局放检测。近年来随着高灵敏度局放检测技术的应用,绝缘子电性能检测精度得到大幅提升。通过改进传感器灵敏度、优化信号降噪算法,实现了对微弱局部放电信号的精准捕捉,能够有效识别绝缘子内部气隙、表面污秽等引发的放电缺陷,为电气性能评价提供了量化依据^[40]。但局放信号仅能反映绝缘子存在电气性能异常,但无法精准区分缺陷的具体类型,如无法有效辨别是内部裂纹、金属杂质还是界面脱粘导致的放电。此外,检测结果易受环境电磁干扰限制,对于早期微小缺陷引发的微弱放电信号,可能因信号衰减或被干扰信号覆盖而漏检。

2)X射线探伤。X射线探伤通过穿透成像实现绝缘子内部缺陷的可视化检测,经过设备升级与技术优化,其检测分辨率和穿透能力不断提升^[41]。目前已能有效识别绝缘子内部的气孔、较大尺寸裂纹等显性缺陷,且通过多角度扫描、三维成像技术的应用,减少了因探伤姿态导致的检测盲区。在盆式绝缘子检测中,X射线探伤作为无损检测手段,可在不破坏产品的前提下实现批量筛查,提高了检测效率。但受设备功率和分辨率限制,对于尺寸微小的微裂纹、金属与环氧内部界面缺陷等难以有效识别,存在明显漏检风险。绝缘子的厚度分布不均会影响X射线的穿透效果,特高压盆式绝缘子因直径和厚度较大,内部应力集中区域的缺陷易被遮挡。此外,X射线对检测人员存在辐射危害,检测过程需严格防护,且设备成本高、检测效率不足,难以满足大规模批量生产的高效检测需求。

3)机械试验。压力耐受试验和例行机械试验是考核绝缘子机械强度的核心手段,经过标准化规范与设备改进,检测的准确性和重复性显著提升。目前压力耐受试验分为例行气压试验和压力破坏试验。对于特高压盆式绝缘子,例行气压试验测试压力通常为设计压力的2倍,压力破坏试验按比例抽检,通常采用水压破坏试验方法,且要求破坏值大

于3倍设计压力。通过压力耐受试验能够有效筛选出机械强度不达标产品,并考核批量制造过程中产品工艺稳定性。例行机械试验包含抗弯、抗压等试验项目,同压力耐受试验核心功能一致,仅能评价绝缘子的整体机械性能是否满足设计要求,若出现性能不达标情况,无法定性问题根因,对绝缘子制造缺乏指导意义。同时此类试验的核心局限在于产品需要装配至特定工装上,检测效率不足,且部分试验为破坏性抽检试验,增加了绝缘子制造成本^[42]。传统检测方法对于生产过程中因浇注工艺不当、脱模操作不规范等产生的残余应力缺乏有效检测手段,而残余应力长期作用可能导致绝缘子在运行中出现裂纹扩展,易引发突发故障。

绝缘子传统检测方法(局放检测、X射线探伤、水压等机械试验)在保障电力系统安全运行中发挥了基础作用,但在缺陷精准识别、残余应力检测、全量无损筛查等方面存在明显局限。近年来,以太赫兹时域光谱、激光超声、声弹效应等为代表的先进物理检测技术,为潜隐性缺陷检测提供了全新手段。

1.2.2 太赫兹

太赫兹波(terahertz wave)通常指频率范围为0.1~10 THz、电磁波长约30 μm~3 mm的电磁波,其位于红外与微波之间,在空间分辨率与材料穿透能力之间具有独特的优势^[43]。与可见光与红外检测方法相比,太赫兹波对环氧树脂等高分子绝缘材料表现出更优的穿透性能;而相较于微波,太赫兹波较短波长的特点又能够提供更高的空间分辨率。因此,太赫兹无损检测技术在GIS/GIL中高填料环氧复合绝缘件的内部缺陷检测与结构表征中具有良好的应用潜力。

结合具体传播过程来看,太赫兹无损检测实际上是建立在电磁波跨介质传播及界面响应机制基础上的。当脉冲信号进入材料内部后,随着传播路径的延伸,不同介质之间的折射率差异会逐渐显现出来,使得电磁波在界面位置发生分界传播,即一部分能量被反射,另一部分继续向前透射。对于这一过程,其反射强度通常可由式(1)进行定量描述

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (1)$$

式(1)中, n_1 和 n_2 分别为界面两侧介质的折射率。由于折射率突变明显,实际应用场景中环氧树脂与空气界面通常会产生强反射信号,这也是识别气泡、分层及界面脱粘缺陷的重要依据。

此外,反射信号在时域中的延迟信息直接反映缺陷或界面的空间位置,其传播关系可表示为

$$n = \frac{c \cdot \Delta t}{2d} \quad (2)$$

式(2)中: c 为真空光速; Δt 为太赫兹脉冲往返传播时间; d 为传播路径长度。通过对回波时间延迟进行分析,可实现对材料内部多层结构及缺陷深度的定量反演^[44]。进一步地,在频域分析中,材料对太赫兹波的吸收特性可由参考信号与样品信号的频谱幅值关系进行表征。在实际工程应用中,在忽略空气—样品界面菲涅耳透射损耗或将其视为常数项处理时,可得到吸收系数的简化表达式

$$\alpha(\omega) = \frac{2}{d} \ln \frac{E_{\text{ref}}(\omega)}{E_{\text{sam}}(\omega)} \quad (3)$$

式(3)中: $E_{\text{ref}}(\omega)$ 和 $E_{\text{sam}}(\omega)$ 分别为参考信号与样品信号的频谱幅值; d 为样品厚度。该表达式假设太赫兹波在材料内部传播过程中主要衰减来源为材料吸收,而界面反射与透射效应对幅值的影响相对较小或可通过系统标定予以抵消。因此,该简化模型在材料厚度较均匀、界面数量较少或主要关注相对变化趋势的工程检测场景中具有良好的适用性,可用于评估材料内部结构均匀性及缺陷引起的能量衰减特征。

在具体检测方法中,太赫兹时域光谱(THz-TDS)技术是目前应用最为广泛的手段之一。该方法通过获取太赫兹脉冲在样品中的完整时域波形,实现对材料折射率、吸收特性及内部界面分布的综合分析。

反射式太赫兹时域光谱系统的基本结构见图2。从工作过程来看,系统利用飞秒激光激发产生太赫兹脉冲,经光路调制后入射至被测样品表面,随后由探测器接收返回的回波信号,从而实现对材料内部结构的非接触式探测。在反射式THz-TDS系统中,不同深度界面对应不同时间延迟的回波信号。典型特征表现为:分层结构会产生多重回波信号,界面气隙通常表现为回波相位反转及幅值增强,而界面脱粘缺陷则会引起反射信号异常增强^[45]。通过对时域信号的解析,可实现对缺陷位置及类型的有效识别。

2 mm厚GIS环氧树脂复合材料在反射式太赫兹时域光谱系统下获得的时域信号见图3。从图3可以看到,太赫兹脉冲在穿过样品后,于下方金属反射板位置形成清晰回波并被系统接收,说明太赫兹波能够透过该厚度样品并返回探测端。这一实验现象为后续开展基于太赫兹技术的绝缘材料检测研究提供了实验基础。

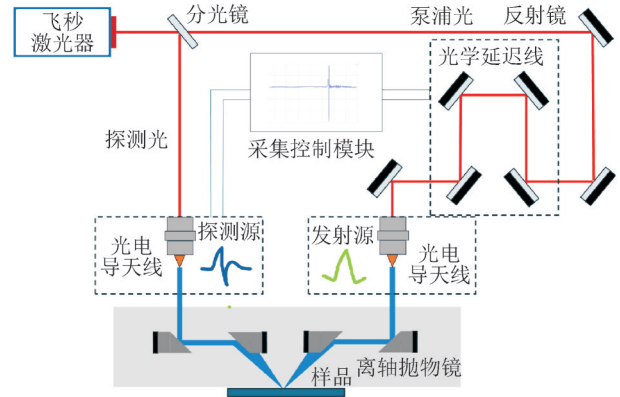


图2 反射式太赫兹时域光谱系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of reflective terahertz time-domain spectroscopy system

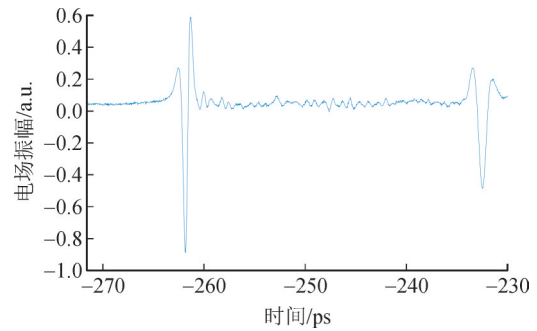


图3 2 mm厚GIS环氧树脂复合材料的反射式太赫兹时域信号

Fig. 3 Reflective terahertz time-domain signal of 2 mm thick GIS epoxy composite

对于GIS/GIL中使用的环氧树脂复合绝缘材料,其结构本身往往较为复杂,例如高填料含量、多界面分布以及曲面几何特征等,这些因素都会对太赫兹波的传播过程产生影响。在实际传播过程中可以发现,材料内部的不均匀性会引入额外的散射与吸收效应,从而改变信号特征。具体来看,高填料体系会导致介电常数在空间上的分布不均,使太赫兹波在传播过程中更容易发生体散射,进而对信号的信噪比产生不利影响。同时,由于样品表面及内部界面往往具有一定曲率,入射条件不再理想,反射路径也随之变得更加复杂,这在一定程度上增加了后续信号解析的难度。

在太赫兹检测技术方面,国外学者Fukasawa等首次将太赫兹波层析成像技术应用于环氧绝缘子的内部缺陷检测^[46]。Zhong等则将太赫兹飞行时间层析成像技术用于塑料材料的缺陷识别,为电力绝缘件检测提供了新思路^[47]。国内学者李斌等开发了连续太赫兹波三维层析成像系统,有效提高了检测效率^[48]。张中浩等基于太赫兹波研究了复合绝缘子界面气隙检测方法,发现有气隙时反射波形呈现反相和幅值增大的双重特性^[49]。刘文通等通过实验

证,明确了GIS绝缘子界面缺陷在电场作用下的演化规律及其对击穿特性的影响,为太赫兹检测技术的应用提供了故障机理支撑。

1.2.3 激光超声

激光超声是一种非接触式、高灵敏度、高空间分辨率的无损检测方法:利用脉冲激光照射材料表面产生瞬态热输入,引起材料表层的热弹效应(或能量更高时的烧蚀效应)进而激发宽频带弹性波,再通过压电探头或激光干涉/激光多普勒测振等方式对表面振动进行无接触接收,实现缺陷识别与成像^[50]。国外学者 White 建立了一维激光激励热膨胀模型,为激光超声技术奠定了理论基础^[51]。Doyle 提出的热扩散体力源模型,进一步完善了激光超声的激励机制^[52]。国内研究中,吴然等提出利用 CNT-PDMS 复合薄膜提高激光超声转换效率,并将激光致声增强技术应用于环氧界面缺陷检测,有效解决了环氧树脂光声转换效率不足的难题^[53]。对于 GIS 环氧树脂绝缘件界面缺陷,传统 X 射线在“金属嵌件—树脂曲面结构”上存在盲区、接触式超声易受连续反射影响、渗透法难以发现内部缺陷^[54];相比之下,激光超声能够在不耦合、不接触条件下突出缺陷响应,并具备毫米级乃至更高分辨潜力^[55]。

激光在多层复合材料中激发超声波及其传播本质是一个复杂的热弹耦合过程,产生的热效应和弹性波传递可利用热传导方程和热弹耦合控制方程来描述。

热传导方程为

$$\rho C \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \nabla \cdot [\kappa \nabla T(r,t)] + Q(r,t) \quad (4)$$

热弹耦合控制方程为

$$\mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot u) = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (3\lambda + 2\mu) \alpha \nabla T \quad (5)$$

在环氧树脂表面通过低能量脉冲激光激发热弹性超声,避免烧蚀损伤,产生宽频纵波、横波及表面波。环氧树脂材料中激光激励超声的主要波形见图4。纵波(P波)的传播方式:质点振动方向与传播方向一致,是“压缩—膨胀”波。作为最先到达、速度最快、能量最大、频率较高的波形,对应圆弧向下扩展的强烈半圆形波前,就是主导的纵波。横波(S波)的传播方式质点振动方向与传播方向垂直,是剪切形变。在激光激励中,多由纵波在界面、缺陷处模式转换产生。振幅比纵波略小。表面波(Rayleigh波)的传播方式局限在材料表面附近,随深度迅速衰减,质点运动呈椭圆轨迹。在图中表现为沿着上表面左右传播的一条“贴着表面走”的波束,能量集中在表层。

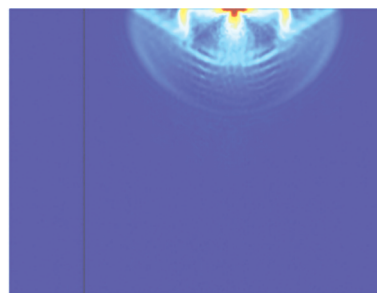


图4 激光激励超声波主要形式

Fig. 4 Main forms of laser-induced ultrasonic waves

相关研究采用滴涂法在玻璃/PDMS基底上成功制备了多批激光致声增强介质薄膜,构建了稳定的“玻璃/MXene/PDMS/水介质”分层结构。制备过程中对分散液浓度、滴涂体积、基底转速及烘干温度等关键工艺参数进行了多轮优化,使MXene层在玻璃表面形成连续、致密且厚度可控的薄膜,并在其上覆盖适当厚度的PDMS保护层与声学匹配层,实现了良好的机械稳定性和水环境下的长期工作可靠性。在材料设计上,以二维MXene纳米片为光热转换基体,引入金纳米颗粒(Au NPs)实现等离子体共振增强。通过调节HAuCl₄添加量和还原条件,获得了多组不同MXene含量及Au NPs负载比(如1:2、1:4等)的复合分散液,并制备出系列MXene/Au复合薄膜样品。基于建立的电磁/声学多物理场模型,对不同纳米结构条件下的声场分布进行了仿真分析,为优化颗粒排布和结构参数提供了理论依据,见图5。

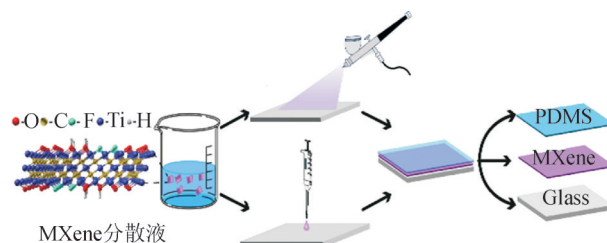


图5 激光致声增强介质薄膜制备流程图

Fig. 5 Preparation flow chart of laser acoustic enhanced dielectric film

在表征方面,已经利用TEM、SEM等手段系统分析了Au NPs在MXene片层表面的负载状态与界面结合方式。结果显示,Au NPs在优化配比条件下能够较为均匀地分布于MXene片层表面及片间间隙,形成紧密接触或部分包覆的复合结构,有效增加了局域等离子体“热点”数量。结合光吸收谱、表面温升测试及仿真结果,进一步证明这种负载方式有利于提升入射激光的吸收效率和瞬态热生成功率,为光—热—弹转换效率的提升提供了清晰的结构设计依据,并初步锁定了若干性能优越的MXene/Au复合配比区间,见图6。

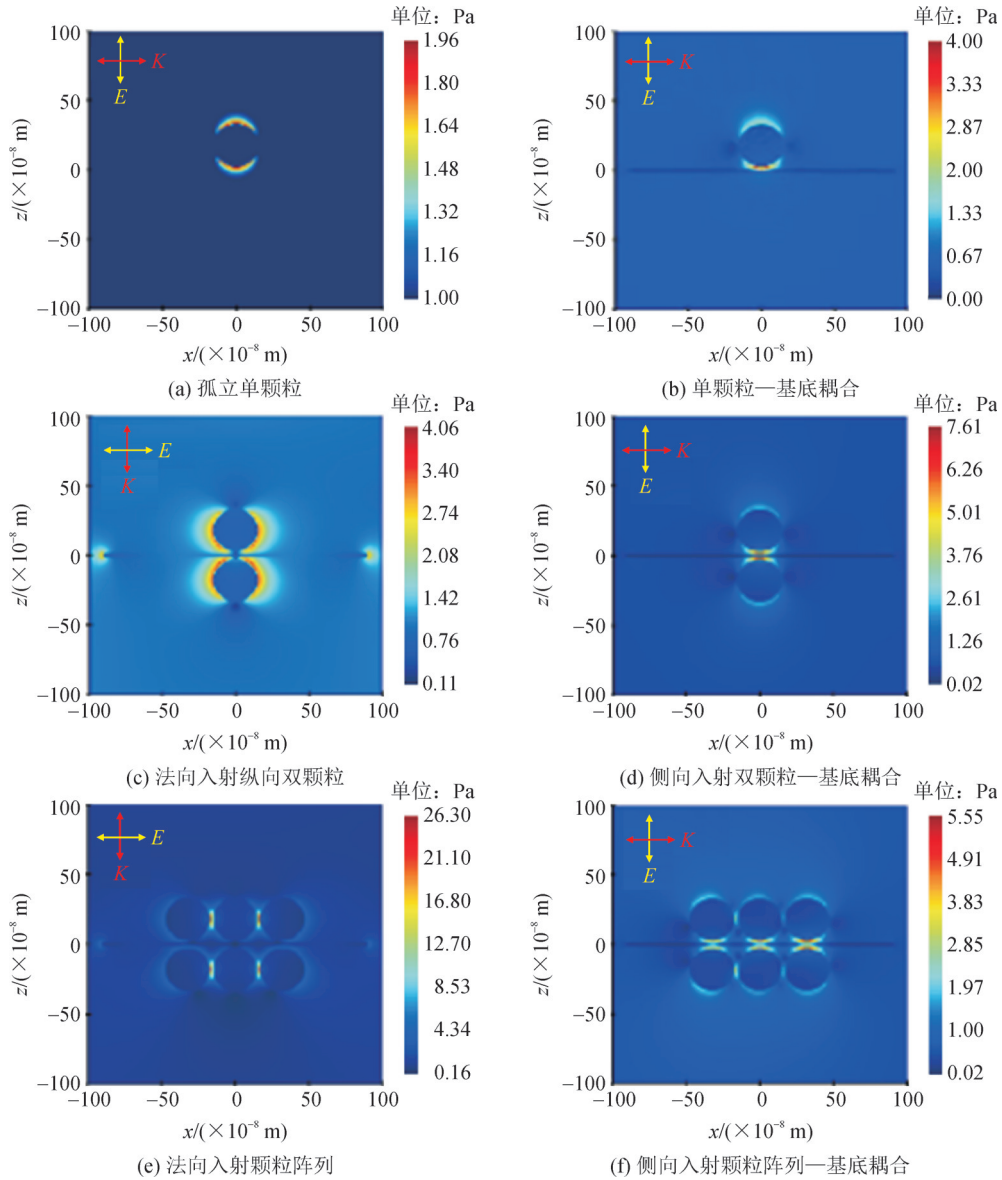


图6 不同纳米机构下声场分布仿真

Fig. 6 Simulation of sound field distribution under different nanostructures

1.2.4 声弹检测

用于气体绝缘电器设备的绝缘子通常由环氧树脂基体和微米级氧化铝填料经真空浇注固化而成,这种非均质且具有粘弹性的复合材料,给传统的超声应力检测带来了挑战。常用于超声残余应力无损检测的波形有纵波和临界折射纵波,其应力检测灵敏度、检测范围与材料自身特性、超声波类型、频率等密切相关^[56]。超声纵波在无限大各向同性均匀弹性体内传播时,其声速 c_L 可被简化为

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (6)$$

式(6)中: c_L 为弹性体内的纵波声速; ρ 为弹性体的密度; E 为弹性体的弹性模量; ν 为弹性体的泊松比。超声纵波即超声波传播方向与质点振动方向相同的超声波,纵波声速的相对变化与在弹性体上

施加一定范围内的应力间存在线性关系^[57]

$$\frac{v-v_0}{v_0} = K\sigma \quad (7)$$

式(7)中: v_0 为材料在零应力状态下的超声纵波速度; v 为施加应力状态下超声纵波速度; K 为声弹性系数; σ 为施加应力状态下超声传播区域内的平均应力。同种材料的声弹性系数 K 为常数,用于表征材料内部应力与超声声速的相对变化之间的敏感程度,其与材料弹性常数、超声频率、波形相关^[58]。使用与被测工件完全相同材料制作的标准无应力拉伸试样,将试样夹持在万能实验机上,在施加拉压应力的同时记录对应的声速,应力与声速线性拟合得到的斜率 k 与 v_0 之比即为声弹性系数^[59-60]。

超声纵波应力检测包括反射法和透射法见图7。图7中反射法通过测量超声纵波在材料中的一次和二

次底面反射回波峰值之间的时间差 Δt_1 以及波程来计算超声声速 $v^{[61]}$,而透射法基于超声始波与接收波形的时间差 Δt_2 计算超声声速,通常反射法的单一探头便于操作、声轴与探头位于同一直线且声程不含耦合剂厚度,故其精度高于透射法。超声纵波在材料中传播时,能量随着传播距离的增加而衰减,接收探头将不能获取有效的清晰信号,绝缘子中高填充比的氧化铝颗粒对高频超声波产生强烈的瑞利散射,限制了检测频率的上限,检测时常采用频率为1~5 MHz的探头^[62],进一步可选取特定超声模态提高应力检测的灵敏度^[63]。超声频率的降低可以提高检测深度但限制了应力成像的空间分辨率,基于反射法的绝缘子检测深度通常不超过90 mm^[64],而透射法理论上可以实现反射法的两倍检测深度。

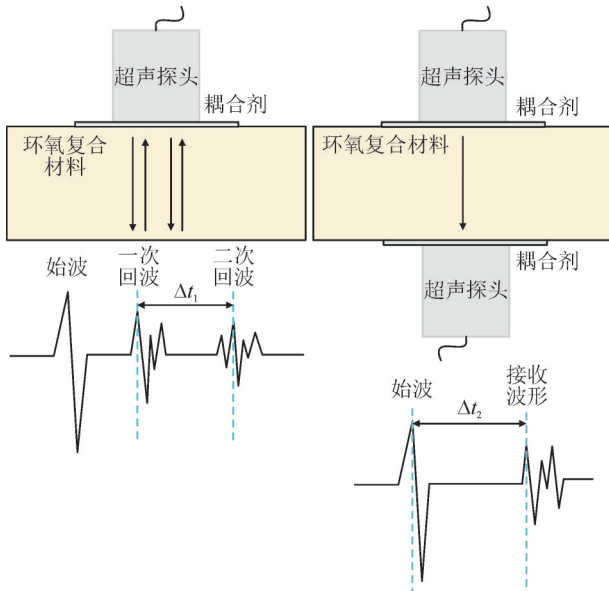


图7 超声纵波检测示意图

Fig. 7 Ultrasonic longitudinal wave inspection diagram

如图8所示,当超声纵波以第一临界角 θ_{CR} 从介质1入射至介质2时,在介质2中一定深度内折射出临界折射纵波 L_{CR} , L_{CR} 波可以检测对应深度内的应力,具备一定的层析检测能力^[65],但只能检测表面的残余应力,通常深度不超过绝缘子表层下17 mm^[66]。

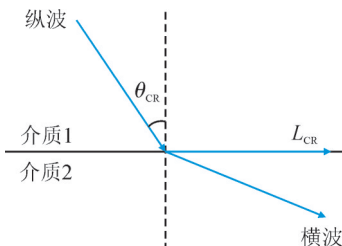


图8 超声临界折射纵波检测示意图

Fig. 8 Schematic diagram of ultrasonic critical refraction longitudinal wave testing

现阶段盆式绝缘子的应力检测较为完善,但对

三支柱绝缘子的应力分布情况仅能实现部分表征。郝艳捧等人基于 L_{CR} 波检测了252 kV盆式绝缘子在不同温度下的热应力梯度,加热中心嵌件至110 ℃时,其9 mm深度次表面的最大热应力可达5.19 MPa^[66]。邹舟诣奥基于反射法测量了126 kV三相共箱式盆式绝缘子水压试验下法向、径向、周向的三正交应力,在1 MPa水压下,径向应力变化最大,可达0.39 MPa^[67]。除了测量模拟工况加载下的应力变化,陈荣等人基于超声反射法直接测量了110 kV单相盆式绝缘子的残余应力,最大拉应力为18.1 MPa,最大压应力可达19.3 MPa^[68]。为进一步消除人工手持探头检测造成的耦合层厚度不一与位置误差,郝艳捧等人则采用光电式位置传感器确保检测超声信息与空间位置的一一对应^[69]。郑尧等人使用2.5 MHz探头测量了三支柱绝缘子支腿在0~5 kN轴向载荷下的应力,与仿真最大偏差为2.26 MPa^[70]。目前针对三支柱绝缘子的相关研究相对匮乏,这主要归因于其复杂的异形曲面带来的声耦合难题。由于此类检测往往需要针对特定曲率形貌定制专用耦合楔块,导致其通用性较差。为规避这一限制,李玄等人提出了一种从金属套筒内侧向外激励超声的检测策略^[71]。

相比于金属材料,如钢轨的声弹性系数为 $1.14 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ ^[72],GIS/GIL用环氧树脂复合材料的声弹系数更大,一般大于 $4 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ ^[62],适于超声应力检测,但因氧化铝沉降存在密度梯度、探头声耦合过程的位置偏移等问题,导致声速变化中耦合了多重非应力因素,降低了应力反演的精度。陈承相等人对1100 kV盆式绝缘子固化过程残余应力分布的仿真表明中心嵌件与屏蔽环周围为残余应力集中区,最高可达34.1 MPa^[73],基于光弹性法的实验测量表明在金属—环氧树脂界面的最大残余应力偏大,最高可达10.57 MPa^[74]。此外,环氧树脂凝胶前黏度较低,氧化铝微粒在重力作用下向模具下方沉降,研究表明绝缘子整体的最大密度差异为0.1~0.2 g/cm³^[75]。但基于 L_{CR} 波检测550 kV盆式绝缘子次表面应力的结果表明,嵌件周围盆壁曲率大处与远离浇口一侧的填料沉降区形成检测盲区^[67]。值得注意的是,应力仿真与实验指示的高风险区域,恰恰对应了超声导波检测的物理盲区,因此后续研究多聚焦于超声纵波检测。此外,由于应力场反演图像通过测点间插值生成,金属嵌件与环氧树脂界面间应力信息缺失,使数值在界面周围截断,可能导致图像在形态和数值上出现一定偏差。

超声传播路径的精确测定是保证绝缘子应力

检测准确性的前提。在声弹性系数 K 的标定过程中, 不计应变计延时会导致应力与声速拟合的线性度 R^2 显著降低^[67], 这一现象揭示了应力反演对声程的高敏感性。为减小误差, 文[68]使用双频法消除

了声程在应力计算中的影响, 文[66]通过不同限位块形成的声程差进行检测, 有效控制声程的同时消除了系统延时造成的误差。GIS/GIL 检测方法对比见表 1。

表 1 GIS/GIL 检测方法对比

Table 1 Comparison of inspection and detection methods for GIS/GIL equipment

技术类别	检测技术	检测物理量	主要适用缺陷	典型精度/分辨率	适用场景	主要优点	缺点
在线监测	UHF	300 MHz~3 GHz 电磁脉冲	金属颗粒、尖端或表面放电	放电定位误差约 0.1~1 m	GIS/GIL 运行状态监测、局放预警	抗电磁干扰强	受传感器布置方式、GIS/GIL 结构影响
	超声发射检测	声波、振动、声发射信号	金属颗粒运动、局放声信号、机械松动	定位误差约 0.1~0.5 m	局放辅助定位、颗粒运动识别	外置安装方便, 可与 UHF 互补	易受噪声耦合影响
	气体组分检测	SO ₂ 、SO ₂ F ₂ 、SO ₂ F ₂ 、HF 等气体体积分数	放电、过热、气体绝缘劣化	气体检测下限为 μL/L 级	长期趋势评估	可反映放电/过热的累积过程	定位能力弱, 响应较滞后
	温度在线监测	接头、导体、外壳温度	接触不良、过热、热老化风险	热电偶/光纤测温精度常为 ±0.7 °C; 红外测温约 ±1 °C	热状态监测	适合长期监测	缺陷发展后过热可感, 存在滞后性
	光纤传感监测	温度、振动、应变	过热或异常振动	温度精度约 ±1 °C; FBG 应变分辨率可达 με 级	分布式监测、抗电磁干扰场景	抗电磁干扰, 适合长距离分布测量	昂贵, 依赖于传感器测点
出厂检测、抽检	太赫兹检测	折射率、吸收系数、相位延迟	浅表裂纹、近表层气孔、夹杂、含水、浅层脱粘	轴向分辨率约几十至百 μm; 横向分辨率约 0.2~1 mm; 有效检测深度通常为 mm 量级	出厂浅表筛查、实验室精细成像、近表层缺陷识别	对介电特性变化敏感, 适合非金属浅表缺陷	穿透深度有限, 受填料、含水率和金属屏蔽影响
	激光超声检测	声速、回波幅值、频谱、声阻抗突变	界面脱粘、内部空隙、裂纹、分层	分辨率约 0.1~1 mm; 深度定位精度可达几十 μm 至亚 mm	界面缺陷、内部缺陷、复杂曲面无接触检测	非接触、适合复杂曲面和界面缺陷识别	系统复杂, 对表面状态、防激光烧蚀要求高
	超声残余应力检测	超声波速变化、应力—声速关系	残余应力、装配应力、应力集中	应力测量误差常为 5~10 MPa	固化工艺应力评估、装配应力分析、服役可靠性评价	应力集中和残余应力分布	需标定声弹系数, 受温度、各向异性和材料非均匀性影响
	X 射线检测/工业 CT	X 射线衰减系数、密度差异、三维灰度重构	内部气孔、夹杂、裂纹、缩孔、浇注缺陷、局部密度不均	工业 CT 空间分辨率常约 10~100 μm; 大型绝缘件受尺寸限制多为 0.1~0.5 mm 量级	出厂质量筛查、内部缺陷精细成像、失效分析	可直观显示内部结构和缺陷形貌, 三维 CT 可定量缺陷尺寸、位置和体积分数	设备成本高, 金属嵌件易产生伪影; 不适合在线运行检测
	机械试验/水压试验	压力、变形、泄漏量、破坏载荷	结构强度不足、密封缺陷、界面弱结合、贯通裂纹、宏观制造缺陷	缺陷定位能力较弱, 通过裂纹反演薄弱点	密封性验证、结构强度验证	可直接验证密封和结构可靠性	表观性验证, 缺乏定量分析
	染色法/渗透检测	染料渗透、毛细作用、表面显色	表面开口裂纹、贯通孔隙、表面气孔、界面开口缺陷	可检出亚 mm 级缝隙	出厂表面缺陷筛查、解体后缺陷验证、失效分析	方法简单、成本低, 对表面裂纹敏感, 结果直观	对内部缺陷和深埋界面缺陷无效

现阶段超声应力检测多基于单脉冲激励, 利用材料的线弹性特性, 通过测定双脉冲峰值间的声时差来表征应力。虽然超声探头具有固定中心频率, 但单脉冲决定了其包含多频分量。在标定声弹性系数 K 时, 为确保外施应力精确可控, 采用哑铃型试样^[59~60], 因其声程较短, 频率变化可忽略不计。然而, 随着 GIS/GIL 电压等级的提升, 绝缘子用环氧复合材料的厚度显著增加。超声波在该类材料中长距离传播时易出现色散现象, 导致峰值频率发生偏移^[76], 进而给声时的确定引入误差。因此, 后续研究

需深入考虑超声的非线性特性,并结合先进的信号处理方法以提升检测精度。

郑尧等人基于超声纵波反射法获取了 126 kV 盆式绝缘子密度云图^[77],指出 GIS/GIL 用环氧复合材料的密度 ρ 与声速 c_L 的关系为

$$\rho = 0.0014c_L - 1.734 \quad (8)$$

由式(8)可知,因非均质材料引起的超声声速变化比应力本身更加敏感,而绝缘子密度存在一定差异,如何在超声检测过程中解耦密度与应力对声速的影响仍有待研究。

总体而言,绝缘子的非规则表面形貌、金属嵌件与环氧树脂的异质粘合界面和环氧复合材料的特性对应力检测技术的曲面耦合与空间三维解析能力、界面波信号处理能力、超声传播过程分析与应力反演的误差消除提出了新要求。

2 总结

2.1 工程应用方案优选

文中将可用于 GIS/GIL 的各种检测手段列于表 1,针对 GIS/GIL 绝缘件潜隐性缺陷,应根据缺陷类型、检测特点和工程环境选择合适技术:太赫兹检测对介电常数突变、空气间隙、脱粘、夹杂和含水缺陷较为敏感,适合浅表性缺陷的高分辨率成像^[78];激光超声检测兼具超声检测的体波穿透能力和光学非接触收发优势,相较于太赫兹,激光超声的穿透深度更大,可达到厘米量级,适用于复杂曲面或不宜耦合接触的场景,在界面脱粘、层间气隙等缺陷具有检测优势^[79];超声检测通过建立材料声速受力状态的响应,超声检测能对固化收缩、热循环、机械装配和长期运行引起的残余应力或应力集中提供应力状态评价,是几何缺陷检测技术的重要补充^[80]。在绝缘子生命周期各阶段中,制造出厂阶段的检测条件较好,绝缘件尚未装配,适合开展高分辨率和全覆盖检测。可优先采用太赫兹检测对浅表性缺陷进行快速筛查,对环氧—金属嵌件界面、盆式绝缘子厚壁区域,可采用激光超声检测进行补盲;针对残余应力,则可采用超声检测进行抽样或重点区域评价,形成针对多发耦合缺陷的“太赫兹浅表筛查—激光超声界面复检—声弹效应应力评估”检测流程。在安装交接阶段,检测重点则转向运输、装配过程中可能引入的损伤与应力异常,如螺栓预紧不均、法兰配合偏差,该阶段应可结合便携超声检测平台评估装配载荷引起的应力集中^[81]。而投运后,绝缘子需长期承受高电压、温度梯度、机械载荷

和材料老化的复杂联合作用,潜隐型缺陷易发展,因此在线检测必不可少。

目前,太赫兹、激光超声和超声残余应力检测多用于出厂检测、停电检测、实验室诊断或离线无损检测,在线化应用还处于探索阶段。GIS/GIL 在线检测工程应用中,局部放电最为成熟,其中 UHF (ultra high frequency) 法因具有较强抗电磁干扰能力和较好的封闭金属结构适应性,被广泛用于 GIS/GIL 内部放电缺陷监测^[82]。对于自由金属颗粒、悬浮电位和绝缘子表面放电等典型缺陷,UHF 检测可与超声检测联合使用,提高缺陷类型识别和定位可靠性^[83]。此外,SF₆分解组分在线监测可用于判断放电或过热故障的累积效应^[84],温度和光纤传感监测则适用于检测绝缘子的热状态、振动和结构异常^[85]。因此,GIS/GIL 绝缘件检测应形成以出厂检测避免带病入网,在线监测预警为主、离线精细诊断为辅的多技术融合体系,以提升潜隐性缺陷识别与状态评估的可靠性。

2.2 总结

GIS/GIL 环氧树脂绝缘件的潜隐性缺陷主要包括浅表性缺陷、界面缺陷及残余应力缺陷,其形成机理涉及多物理场耦合与材料非均匀性演化。浅表性缺陷(气泡、杂质)主要源于真空浇注过程中的机械夹杂、气体成核(均相/异相)及模具污染,在高温固化阶段因树脂黏度升高而无法排出。界面缺陷则多发生于环氧树脂与金属嵌件结合处,由二者热膨胀系数差异导致的固化冷却应力集中及界面化学键老化削弱共同作用,易引发气隙并诱发低电压放电。残余应力缺陷是近年来的研究重点,其形成受固化化学收缩与填料沉降双重主导:微米级 Al₂O₃ 在凝胶前期沿重力方向沉降,造成密度分层与功能梯度特性,使非均匀残余应力场集中于填料富集区,显著降低绝缘件断裂韧性并增加开裂风险。目前机理研究虽已较为全面,但仍缺乏缺陷形成与具体工艺参数(温度、压力、配方)之间的定量关联模型,难以为工艺优化提供精准科学依据。

针对 GIS/GIL 绝缘件潜隐性缺陷的无损检测,传统方法(工频局放、X 射线探伤、水压机械试验)存在明显局限:局放无法区分缺陷类型且易受电磁干扰;X 射线对微裂纹及界面脱粘漏检率高,且存在辐射风险与厚度遮挡问题;机械试验仅能评价整体强度,无法检测残余应力且多为破坏性抽检。近年来发展的新型检测技术展现出潜力:太赫兹时域光谱与连续波成像技术可检测浅表性缺陷,通过飞行时间层析实现百微米级精度;激光超声技术利用脉冲

激光激发宽频弹性波, 结合致声增强介质薄膜(如MXene/Au复合结构), 可在非接触条件下检测界面缺陷, 穿透能力达80 mm以上; 声弹检测技术基于超声纵波或临界折射纵波的声弹性效应, 可实现残余应力的定量测量与三维成像, 但受限于复合材料非均质性、曲面耦合及密度—应力解耦难题。总体而言, 新型技术实验室验证效果良好, 但检测效率、穿透深度、复杂结构适应性及工程化集成仍是当前主要瓶颈。

3 展望

未来GIS/GIL绝缘件潜隐性缺陷形成机理的研究应聚焦于多因素耦合作用的量化与动态可视化。首先, 需建立缺陷形成与关键工艺参数(浇注速度、真空度、固化温度曲线、填料粒径分布等)的本构关系模型, 结合机器学习方法挖掘高维数据中的非线性关联, 实现缺陷类型的可预测性调控。其次, 应发展原位、实时表征手段(如同步辐射X射线成像、原位超声监测), 动态追踪气泡演化、填料沉降及应力累积过程, 突破传统“事后分析”的局限。再次, 需构建多尺度仿真框架, 从分子动力学(界面化学键合)、细观力学(颗粒沉降与应力传递)到宏观结构(整体残余应力场)进行跨尺度耦合, 揭示缺陷从成核到扩展的全生命周期规律。此外, 应关注长期电—热—力联合老化环境下潜隐性缺陷的演变机理, 明确缺陷向贯穿性故障转化的临界条件。最终, 形成“工艺参数—缺陷类型—服役性能”的定量映射数据库, 为高质量绝缘件的制造工艺设计与缺陷抑制提供理论基石。

未来GIS/GIL绝缘件潜隐性缺陷的检测技术应朝着高精度、高效率、多模态融合及工程自动化方向发展。针对潜隐型缺陷多发耦合可能引起的信号特征弱化、混叠、判据复杂问题, 后续应建立出厂筛查、在线监测到专项复核的多技术协同量化检测体系, 在明确多种检测手段精度、深度与各类缺陷的分布、尺度前提下, 通过缺陷演化模型认识缺陷特性、多源信号融合有效筛选识别和一定数量样本进行有效性验证, 建立缺陷的分级判断与风险评估方法, 从而实现由单一缺陷识别向多缺陷协同诊断和寿命预测的转变。针对GIS/GIL环氧绝缘件中潜隐缺陷检测难题, 出厂检测是保障GIS/GIL长期安全可靠运行的第一道防线, 突破太赫兹在高填料、厚壁结构中的穿透深度与成像信噪比限制, 发展连续波与脉冲太赫兹协同成像及快速反演算法,

将单一绝缘件小时级检测时长压缩至分钟级; 优化激光超声增强介质的稳定性, 构建基于机械臂、振镜扫描或相控阵接收的非接触自动化检测系统, 并建立缺陷类型、尺寸、位置与超声波形特征数据库, 实现亚毫米级缺陷智能识别; 完善声弹检测中材料密度梯度、温度及残余应力对声速影响的解耦方法, 结合双频超声、非线性超声、导波多模态分析和曲面自适应耦合装置, 提升复杂绝缘件残余应力三维表征精度。另一方面, 工程应用上应推动太赫兹、激光超声、声弹检测与X射线/工业CT、UHF局部放电、光纤传感等技术融合, 构建“出厂精细质量评价—在线状态监测—运维风险预警”的多源协同检测平台, 实现从表层到内部、从几何缺陷到应力场、从单点检测到全寿命周期评估的贯通表征。未来还应结合数字孪生和人工智能算法, 建立缺陷演化模型、检测数据标准和分级评价准则, 最终形成覆盖“原材料—制造工艺—出厂试验—现场运维”的全链条无损检测体系, 为GIS/GIL绝缘件潜隐性缺陷的早期识别、可靠性评估和设备安全运行提供支撑。

参考文献:

- [1] 钟建英, 陈刚, 谭盛武, 等. 高压开关设备关键技术及发展趋势[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2769-2782.
Zhong Jianying, Chen Gang, Tan Shengwu, et al. Key technology and development trend of high-voltage switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2769-2782.
- [2] Braun J M, Ford G L, Fujimoto N, et al. Reliability of GIS EHV epoxy insulators: the need and prospects for more stringent acceptance criteria[C]//Proceedings of the 1991 IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 1991: 467-472.
- [3] 国家发展改革委, 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划[EB/OL]. [2026-04-12]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/ghwb_1320016.html.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. The 14th five-year plan for modern energy system [EB/OL]. [2026-04-12]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/ghwb_1320016.html.
- [4] 杜伯学, 李伟玮, 张长虹, 等. 直流GIS/GIL绝缘子非线性电导改性与电场调控方法研究进展[J]. 高电压技术, 2025, 51(8): 3888-3902.
Du Boxue, Li Weiwei, Zhang Changhong, et al. Research progress on electric field regulation by nonlinear conductive insulators for DC-GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 3888-3902.
- [5] 吴泽华, 田汇冬, 王浩然, 等. 特高压GIL哑铃型三支柱绝缘子优化设计方法[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2754-2761.
Wu Zehua, Tian Huidong, Wang Haoran, et al. Optimization

- design method for UHVAC GIL dumbbell type tri-post insulators [J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2754-2761.
- [6] 李莉苹. 气体组合电器绝缘状态评估与故障诊断技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015: 1-76.
- Li Liping. Research on insulation state evaluation and fault diagnosis technology of gas insulated apparatus[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015: 1-76.
- [7] Tian Fangyuan, Hao Yanpeng, Zou Zhouyao, et al. An ultrasonic pulse-echo method to detect internal defects in epoxy composite insulation[J]. Energies, 2019, 12(15): 2986.
- [8] 何金. 超特高压组合电器绝缘可靠性提升关键技术及工程应用[R]. 2020-12-01: 1-58.
- HE Jin. Key technologies and engineering application for improving insulation reliability of EHV/UHV combined electrical apparatus[R]. 2020-12-01: 1-58.
- [9] 刘云鹏, 杨瑞, 郑林, 等. 特高压换流站阀厅状态监测与智能运维研究综述[J]. 高电压技术, 2025, 51(8): 4285-4299.
- Liu Yunpeng, Yang Rui, Zheng Lin, et al. Review of ultra-high voltage converter station valve hall status monitoring and intelligent operation and maintenance[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 4285-4299.
- [10] Wang Weiwang, Li Shengtao. Research status and development of insulation breakdown in engineering solid dielectrics[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(18): 2015-2028.
- [11] 叶三排, 姚永其, 李星, 等. GIS支柱绝缘子金属嵌件交界面缝隙局部放电特性[J]. 高压电器, 2025, 61(12): 126-132.
- Ye Sanpai, Yao Yongqi, Li Xing, et al. Partial discharge characteristics at the interface gap of metal inserts of GIS support insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(12): 126-132.
- [12] 张滢滢, 郝艳捧, 米鸿儒, 等. GIS绝缘子固化特征与缺陷产生机理研究进展[J]. 高电压技术, 2026, 52(5): 2052-2067.
- Zhang Yingying, Hao Yanpeng, Mi Hongru, et al. Research progress on curing characteristics and defect generation mechanism of GIS insulators[J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(5): 2052-2067.
- [13] 高煜豪, 李维珊. 配网电缆绝缘缺陷检测技术分析[J]. 产业创新研究, 2025(20): 115-117.
- Gao Yuhao, Li Weishan. Analysis of insulation defect detection technology for distribution network cables[J]. Industrial Innovation, 2025(20): 115-117.
- [14] 陈田, 胡睿智, 魏鼎欣, 等. 超特高压环氧绝缘件超声检测技术及典型缺陷声学回波特征分析[J/OL]. 电瓷避雷器, 1-15[2026-04-12]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1129.TM.20250928.0948.002>.
- Chen Tian, Hu Ruizhi, Wei Dingxin, et al. Ultrasonic detection technology and acoustic echo characteristics of ultra-high voltage epoxy insulation parts[J/OL]. Insulators and Surge Arresters, 1-15 [2026-04-12]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1129.TM.20250928.0948.002>.
- [15] Afendi M, Banks W M, Kirkwood D. Bubble free resin for infusion process[J]. Composites Part A Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(6): 739-746.
- [16] Dewangan B, Chakladar N D. Modelling of residual stress during curing of a polymer under autoclave conditions and experimental validation[J]. Computational Materials Science, 2024(241): 113038.
- [17] 韩帅, 高飞, 廖思卓, 等. GIS盆式绝缘子表面缺陷及其诊断方法研究综述[J]. 绝缘材料, 2022, 55(2): 12-22.
- Han Shuai, Gao Fei, Liao Sizhuo, et al. Review on surface defects and diagnosis methods of basin-type insulator in GIS[J]. Insulating Materials, 2022, 55(2): 12-22.
- [18] 杨宁, 毕建刚, 弓艳朋, 等. 1 100 kV GIS设备内部缺陷局部放电带电检测方法试验研究及比较分析[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 37-47.
- Yang Ning, Bi Jiangang, Gong Yanpeng, et al. Experimental research and comparative analysis on live test methods of partial discharge of internal defects in 1 100 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 37-47.
- [19] Plank B, Helmus R, Gschwandtner M, et al. In-situ observation of bubble formation in neat resin during the curing process by means of X-ray computed tomography[C]//Proceedings of the 19th World Conference on Non-destructive Testing, 2016: 13-17.
- [20] Sul I H, Youn J R, Song Y S. Bubble development in a polymeric resin under vacuum[J]. Polymer Engineering & Science, 2012, 52(8): 1733-1739.
- [21] 石凤, 段跃新, 曾秀妮, 等. 双酚A型环氧树脂/催化型固化剂体系的粘度模型[J]. 复合材料学报, 2005, 22(6): 72-79.
- Shi Feng, Duan Yuexin, Zeng Xiuni, et al. Engineering viscosity model for bisphenol-a epoxy resin/catalytic curing agent system[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(6): 72-79.
- [22] 陈允, 于洋, 崔博源, 等. 1 100 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 1 100 kV basin-type insulator[J]. Insulating Materials, 2015, 48(5): 44-49.
- [23] Kim N H, Kim D E, Kim S G, et al. Partial discharge characteristics of void defects in epoxy insulation[C]//2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis(CMD), 2022: 537-540.
- [24] Abiko K, Kato Y, Hohjo H. Raman imaging of residual stress distribution in epoxy resin and metal interface[J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2020, 51(1): 193-200.
- [25] Ohsako F, Yoshizawa K. Molecular theory of adhesion of metal/epoxy resin interface[J]. Kobunshi Ronbunshu, 2011, 68(2): 72-80.
- [26] 陈承相, 李永飞, 郝留成, 等. 1 100 kV GIS绝缘子固化过程应力分布仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4992-5000.
- Chen Chengxiang, Li Yongfei, Hao Liucheng, et al. Simulation study on stress distribution of 1 100 kV GIS insulator during curing[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4992-5000.
- [27] Wang Jian, Wang Zhe, Yan Ningning. Clarifying the chemical reactions of the weakening of adhesion between epoxy resin and metal by molecular dynamic simulation and experiment[J]. Frontiers in Materials, 2022(9): 985758.
- [28] Wang Chuang, Zhou Gang, Sun Qiang. Numerical simulation of the interfacial stress between epoxy resin and metal conductor of power equipment during epoxy curing[J]. High Voltage, 2022, 7(5): 903-915.

- [29] 张书琴, 张克选, 骆常璐, 等. GIS外壳绝缘隔断处的过电压分析与控制措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(11): 181-187.
Zhang Shuqin, Zhang Kexuan, Luo Changlu, et al. Analysis of overvoltage and control measures at the insulation partition of GIS enclosures[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(11): 181-187.
- [30] Kamal M R, Sourour S. Kinetics and thermal characterization of thermoset cure[J]. Polymer Engineering & Science, 1973, 13(1): 59-64.
- [31] White S R, Hahn H T. Process modeling of composite materials: residual stress development during cure. Part II. experimental validation[J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26(16): 2423-2453.
- [32] Bogetti T A, Gillespie J J W. Process-induced stress and deformation in thick-section thermoset composite laminates[J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26(5): 626-660.
- [33] 陈孝信, 周童浩, 刘江明, 等. 基于余弦相似度的GIS放电谱图识别精度提高方法[J]. 浙江电力, 2025, 44(2): 124-132.
Chen Xiaoxin, Zhou Tonghao, Liu Jiangming, et al. A cosine similarity-based method for improving the accuracy of GIS discharge spectrum recognition[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(2): 124-132.
- [34] Kim Y K, White S R. Viscoelastic analysis of processing-induced residual stresses in thick composite laminates[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 1997, 4(4): 361-387.
- [35] Smoleń J, Olesik P, Jafa J, et al. Application of mathematical and experimental approach in description of sedimentation of powder fillers in epoxy resin[J]. Materials, 2021, 14(24): 7520.
- [36] Banks H T, Tran H T. Mathematical and experimental modeling of physical and biological processes[M]. USA: CRC Press, 2009.
- [37] Jin Li, Liu Songtao, Liang Hucheng, et al. Study on non-uniformity and dynamic fracture characteristics of GIL tri-post insulators considering Al_2O_3 sedimentation[J]. High Voltage, 2023, 8(4): 659-667.
- [38] Wang Yufan, Liu Shuntao, Li Jin. Curing kinetics and residual stress modelling of gas-insulated transmission lines tri-post insulators[J]. High Voltage, 2025, 10(4): 976-986.
- [39] 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.
- [40] 张涵博, 宋伟, 董曼玲, 等. GIS局部放电光学检测技术研究综述[J]. 广东电力, 2025, 38(8): 131-142.
Zhang Hanbo, Song Wei, Dong Manling, et al. Review on optical detection technology of GIS partial discharge[J]. Guangdong Electric Power, 2025, 38(8): 131-142.
- [41] 孟玲颖. 一起220 kV变电站GIS设备局部放电缺陷诊断与对策[J]. 电力设备管理, 2024(22): 26-28.
Meng Lingying. Diagnosis and countermeasures of partial discharge defect of GIS equipment in a 220 kV substation[J]. Electric Power Equipment Management, 2024(22): 26-28.
- [42] 司致旭. 新型电力系统中的电气设备检测技术与维护策略[J]. 产品可靠性报告, 2025(1): 70-72.
Si Zhixu. Electrical equipment detection technology and maintenance strategy in new power system[J]. Reliability Reports, 2025 (1): 70-72.
- [43] 唐志国, 李阳. 太赫兹技术在电气设备绝缘缺陷检测研究综述[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 135-144.
Tang Zhiguo, Li Yang. Review of terahertz technology in electrical equipment insulation defect detection[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 135-144.
- [44] 金玉环, 朱凤霞, 封建欣. 基于太赫兹技术的复合材料无损检测研究综述[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023, 21(11): 1295-1305.
Jin Yuhuan, Zhu Fengxia, Feng Jianxin. Review of nondestructive testing of composites based on THz technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023, 21 (11): 1295-1305.
- [45] 刘钊, 陈刚, 赵爽, 等. 多层防热结构太赫兹无损检测及粘接缺陷识别[J]. 无损探伤, 2023, 47(2): 17-21.
Liu Zhao, Chen Gang, Zhao Shuang, et al. Terahertz non-destructive testing and bonding defect identification of multilayer heat-proof structure[J]. Nondestructive Inspection, 2023, 47(2): 17-21.
- [46] Fukasawa R. Terahertz imaging: widespread industrial application in non-destructive inspection and chemical analysis[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015, 5(6): 1121-1127.
- [47] Zhong Hua, Xu Jingzhou, Xie Xu, et al. Nondestructive defect identification with terahertz time-of-flight tomography[J]. IEEE Sensors Journal, 2005, 5(2): 203-208.
- [48] 李斌, 谢立明, 黎艳兵, 等. 基于太赫兹成像结合压缩感知与超分辨的葵花籽饱满度检测[J]. 农业工程学报, 2025, 41(3): 263-271.
Li Bin, Xie Liming, Li Yanbing, et al. Detection of sunflower seed plumpness based on terahertz imaging combined with compressive sensing and super-resolution[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(3): 263-271.
- [49] 张中浩, 梅红伟, 刘建军, 等. 基于太赫兹波的复合绝缘子界面检测研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 989-998.
Zhang Zhonghao, Mei Hongwei, Liu Jianjun, et al. Detection method of interfacial defects of composite insulators based on THz wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 989-998.
- [50] 王伟, 刘宏, 董理科, 等. 基于激光超声峰值重建算法的盆式绝缘子缺陷检测研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(1): 96-101.
Wang Wei, Liu Hong, Dong Like, et al. Research on basin insulator defect detection based on laser ultrasonic peak reconstruction algorithm[J]. Insulating Materials, 2023, 56(1): 96-101.
- [51] White R M. Generation of elastic waves by transient surface heating[J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(12): 3559-3567.
- [52] Doyle P A. On epicentral waveforms for laser-generated ultrasound[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 1986, 19(9): 1613-1623.
- [53] 吴然然, 夏慧, 张晶晶, 等. 碳纳米管-聚二甲基硅氧烷的光

- 声特性[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(7): 2079-2086.
- Wu Ranran, Xia Hui, Zhang Jingjing, et al. Photoacoustic properties of carbon nanotubes - polydimethylsiloxane[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(7): 2079-2086.
- [54] 徐天勇, 董晓虎, 李荣超, 等. 复合绝缘子内部缺陷的超声相控阵检测研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 75-79, 114.
- Xu Tianyong, Dong Xiaohu, Li Rongchao, et al. Ultrasonic phased array detection of composite insulator internal defects[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 75-79, 114.
- [55] 晋涛, 王伟, 梁基重, 等. 基于声衰减特性的激光超声盆式绝缘子缺陷检测研究[J]. 电瓷避雷器, 2023(3): 161-165.
- Jin Tao, Wang Wei, Liang Jizhong, et al. Research on laser ultrasonic defect detection of basin insulator based on acoustic attenuation characteristics[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023 (3): 161-165.
- [56] 何伟明, 郝艳捧, 邹舟诣奥, 等. GIS盆式绝缘子应力超声检测技术应用与展望[J]. 广东电力, 2021, 34(1): 13-20.
- He Weiming, Hao Yanpeng, Zou Zhouyiao, et al. Application and prospect of ultrasonic testing technology for stress in GIS basin insulators[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(1): 13-20.
- [57] 荣亚鹏, 陈允, 王亚祥, 等. 环氧树脂复合材料残余应力检测技术研究进展[J]. 复合材料科学与工程, 2024(8): 110-118.
- Rong Yapeng, Chen Yun, Wang Yaxiang, et al. Detection technique progress of the residual stress in epoxy composites[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2024(8): 110-118.
- [58] Abbasi Z, Ozevin D. Acoustoelastic coefficients in thick steel plates under normal and shear stresses[J]. Experimental Mechanics, 2016, 56(9): 1559-1575.
- [59] Zou Z, Qiu Haian, Tian Fangyuan, et al. Stress measurements of GIS epoxy with transverse waves based on ultrasonic pulse-echo method[J]. Applied Sciences, 2023, 13(18): 11317.
- [60] Zou Z Y, Hao Y P, Tian F Y. An ultrasonic longitudinal through-transmission method to measure compressive internal stress in epoxy composite specimens[J]. Energies, 2020, 13(5): 1248.
- [61] Xu Yao, Yang Zhanfeng, Zhou Haiqiang, et al. Application of acoustoelasticity in studying compressive stress state in polymer bonded explosive[C]//2015 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT), 2015: 95-99.
- [62] 郝艳捧, 梁学致, 黄盛龙, 等. GIS/GIL绝缘子超声检测研究进展与展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(9): 3596-3606.
- Hao Yanpeng, Liang Xuezhi, Huang Shenglong, et al. Status and prospect of ultrasonic detection for GIS/GIL insulators[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3596-3606.
- [63] 许西宁, 叶阳升, 江成, 等. 钢轨应力检测中超声导波模式选取方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2473-2483.
- Xu Xining, Ye Yangsheng, Jiang Cheng, et al. Research on method for mode selection of guided ultrasonic waves in stress measurement of rails[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11): 2473-2483.
- [64] 黄盛龙. GIS/GIL绝缘子缺陷超声快速成像方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2024.
- Huang Shenglong. Research on ultrasonic rapid imaging method for GIS/GIL insulator defects[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2024.
- [65] Bray D E, Tang Wei. Subsurface stress evaluation in steel plates and bars using the LCR ultrasonic wave[J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, 207(2): 231-240.
- [66] Hao Yanpeng, Zheng Yao, He Weiming, et al. A measurement method of ultrasonic critical refraction longitudinal wave for thermal stress in GIS basin-type insulators[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022(71): 1-9.
- [67] 邹舟诣奥. 基于声弹性效应的GIS盆式绝缘子应力超声检测理论和方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- Zou Zhouyiao. Research on ultrasonic detection theory and method of GIS basin insulator stress based on acoustoelastic effect[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [68] 陈荣, 何金, 贺春, 等. GIS盆式绝缘子残余应力分布检测及成像研究[J]. 高压电器, 2025, 61(9): 18-23.
- Chen Rong, He Jin, He Chun, et al. Study on detection and imaging of residual stress distribution in GIS insulating spacer[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(9): 18-23.
- [69] 郝艳捧, 黄盛龙, 申子魁, 等. 环氧复合绝缘内部缺陷超声自动检测系统[J]. 广东电力, 2024, 37(3): 72-81.
- Hao Yanpeng, Huang Shenglong, Shen Zikui, et al. Ultrasonic automatic detection system for internal defects of epoxy composite insulation[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(3): 72-81.
- [70] 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.
- [71] 李玄, 尹奕淳, 师伟, 等. 三支柱绝缘子微缺陷超声临界纵波探测方法与应用[J]. 电工技术学报, 2025, 40(21): 6905-6921.
- Li Xuan, Yin Yichun, Shi Wei, et al. Ultrasonic critical longitudinal wave detection method and application for microdefects in tri - post insulators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(21): 6905-6921.
- [72] 许西宁, 叶阳升, 余祖俊, 等. 基于声弹性效应的钢轨应力检测方法[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(4): 37-43.
- Xu Xining, Ye Yangsheng, Yu Zujun, et al. The method to measure rail stress based on acousto - elastic effect[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(4): 37-43.
- [73] 岳嵩, 朱勇, 何龙寿, 等. 基于改进动态电弧模型的GIS快速暂态过电压特性研究[J]. 智慧电力, 2025, 53(8): 114-120.
- Yue Song, Zhu Yong, He Longshou, et al. Research on characteristics of very fast transient overvoltage in GIS based on an improved dynamic arc model[J]. Smart Power, 2025, 53(8): 114-120.
- [74] 李蕊, 乔梦嫣, 杨佳, 等. 环氧树脂基体中圆柱夹杂引起的界面残余应力研究[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(8): 101-104.
- Li Rui, Qiao Mengyan, Yang Jia, et al. Investigation of interfacial residual stress caused by cylindrical inclusions in epoxy resin matrix[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(8): 101-104.
- [75] 李进, 陈思源, 杜伯学. 超大尺寸GIL三支柱绝缘子固化残余应力与成型可靠性研究述评[J]. 电气工程学报, 2025, 20(4): 376-388.

- tics of GIL temperature field under different environmental factors [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2020, 39(3): 136-143.
- [23] ASME B31.3—2022 Process piping[S].
- [24] 薛禹群, 张云. 长江三角洲南部地面沉降与地裂缝[J]. 华东地质, 2016, 37(1): 1-9.
- Xue Yuqun, Zhang Yun. Ground subsidence and ground fissures in the southern yangtze river delta[J]. East China Geology, 2016, 37(1): 1-9.
- [25] 王双, 严学新, 揭江, 等. 珠江三角洲平原区地面沉降影响因素分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(5): 98-104.
- Wang Shuang, Yan Xuexin, Jie Jiang, et al. Analysis on factors affecting ground settlement in plain area of pearl river delta[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(5): 98-104.
- [26] 梁景才. 珠江三角洲平原区地面沉降成因机理分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(5): 162-165.
- Liang Jingcai. Analysis on the causes of land subsidence in the pearl river delta plain[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2022, 45(5): 162-165.
- [27] Kouretzis G P, Karamitos D K, Sloan S W. Analysis of buried pipelines subjected to ground surface settlement and heave[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(8): 1058-1071.
- [28] Imura S. Simplified mechanical model for evaluating stress in pipeline subject to settlement[J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(6): 469-479.
- [29] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范(2016年版)[S].
- GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings(2016 edition)[S].
- [30] Vazouras P, Karamanos S A. Structural behavior of buried pipe bends and their effect on pipeline response in fault crossing areas [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2017, 15(11): 4999-5024.
- [31] Li Xiaoxuan, Xie Qiang, Fan Shenggang, et al. Seismic evaluation of gas insulated lines(GIL) based on a newly defined key control metric and a simplified theoretical model[J]. Engineering Structures, 2025(345): 121466.
- [32] 陈允, 崔博源, 韩先才, 等. 特高压 GIL 用伸缩节的研制及型式试验[J]. 高压电器, 2022, 58(2): 164-170.
- Chen Yun, Cui Boyuan, Han Xiancai, et al. Development and type test of expansion joint for UHV GIL[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 164-170.
- [33] 徐长福, 赵新冬, 梁伟, 等. 基于数字孪生技术的 GIL 综合管廊气体泄漏与排除全过程风险性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 160-171.
- Xu Changfu, Zhao Xindong, Liang Wei, et al. Risk assessment of gas leakage and elimination in GIL utility tunnels based on digital twin technology[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 160-171.
- [34] Dong Xuzhu, Cai Li. The proceedings of 2023 4th international symposium on insulation and discharge computation for power equipment (IDCOMPU2023): volume I[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024.
- 赵佳艺(2004—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为 GIL 外壳的形变响应特性(E-mail: 2215122505@stu.xjtu.edu.cn)。
- 吴治诚(1993—), 男, 博士, 副教授, 博导, 主要从事 GIS/GIL 设备绝缘可靠性评估提升及先进电工环材料制备与研发的研究工作(通信作者)(E-mail: hvzcwu@xjtu.edu.cn)。

(上接第 14 页)

- Li Jin, Chen Siyuan, Du Boxue. Curing residual stress and forming reliability of oversized GIL tri-post insulators: a review[J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(4): 376-388.
- [76] Ono K. Ultrasonic attenuation of engineering materials[J]. Applied Sciences, 2020, 10(12): 2230.
- [77] Zheng Yao, Hao Yanpeng, Liu Lin, et al. An ultrasonic nondestructive testing method for density uniformity of basin-type insulators in GIS[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021(70): 1-8.
- [78] Guo Chenjun, Xu Wenlong, Cai Mingming, et al. A review: application of terahertz nondestructive testing technology in electrical insulation materials[J]. IEEE Access, 2022(10): 121547-121560.
- [79] Li Yu, Xie Congzhen, Gou Bin, et al. Terahertz detection of interface defects within composite insulators using a gated recurrent neural network[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(2): 704-712.
- [80] Gao Tianfang, Wang Yishou, Qing Xinlin. A new laser ultrasonic inspection method for the detection of multiple delamination defects[J]. Materials, 2021, 14(9): 2424.
- [81] 贾文达, 曹志伟, 王继豪, 等. GIS 操作电磁骚扰的三维全波仿真及电弧模型影响分析[J]. 电力工程技术, 2025, 44(6): 134-142.
- Jia Wenda, Cao Zhiwei, Wang Jihao, et al. Effect of the arc model on electromagnetic interference caused by GIS switch operations in 3D full wave simulation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(6): 134-142.
- [82] Cao Tienan, Cui Yufei, Tan Haotian, et al. Research on a degradation identification method for GIS UHF partial discharge sensors based on S-parameters[J]. Sensors, 2025, 25(22): 6860.
- [83] Jing Qianzhen, Yan Jing, Lu Lei, et al. A novel method for pattern recognition of GIS partial discharge via multi-information ensemble learning[J]. Entropy (Basel, Switzerland), 2022, 24(7): 954.
- [84] Mahdi A S, Abdul-malek Z, Arshad R N. SF₆ decomposed component analysis for partial discharge diagnosis in GIS: a review[J]. IEEE Access, 2022(10): 27270-27288.
- [85] Zhou H, Ma G, Wang Y, et al. Optical sensing in condition monitoring of gas insulated apparatus: a review[J]. High Voltage, 2019, 4(4): 259-270.
- 贺春(1976—), 男, 硕士研究生, 正高级工程师, 主要研究方向为输变电设备状态检测、评价与故障诊断研究(E-mail: chun.he@tj.sgcc.com.cn)。
- 赵思源(1998—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为断路器开断技术、输变电设备状态检测研究(通信作者)(E-mail: zhaosiyuan2357@qq.com)。