第 49 卷 第 9 期：3596-3606　　高电压技术　　Vol.49, No.9: 3596-3606
2023 年 9 月 30 日　　High Voltage Engineering　　September 30, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221594

GIS/GIL 绝缘子超声检测研究进展与展望

郝艳捧[1]，梁学致[1]，黄盛龙[1]，郑　尧[1,2]，王国利[2]，高　超[2]，周福升[2]
（1. 华南理工大学电力学院，广州 510640；2. 南方电网科学研究院有限责任公司，广州 510080）

摘　要：气体绝缘开关/气体绝缘输电线路(gas insulated switchgear/gas insulated transmission lines, GIS/GIL)绝缘子应力集中、密度不均匀和内部集中缺陷可能是目前威胁 GIS/GIL 设备安全运行的主要原因，急需研究其检测方法。为此分析了 GIS/GIL 绝缘子应力集中、密度不均匀和内部集中缺陷的原因和检测技术现状，系统总结了 GIS/GIL 绝缘子常用环氧复合材料超声检测技术的研究进展，包括纵波声速、检测深度、灵敏度、第一临界角和临界折射纵波渗透深度等超声传播特性，超声临界折射纵波的声弹性效应和声弹性系数、GIS/GIL 绝缘子次表面应力临界折射纵波声程差检测法和热应力云图、三支柱绝缘子柱腿平行应力纵波反射法和垂直应力纵波穿透法等超声应力检测技术，GIS/GIL 绝缘子内部缺陷纵波反射法成像、表面缺陷临界折射纵波法和界面缺陷纵波斜入射法等内部集中缺陷超声检测技术，以及盆式绝缘子纵波反射法密度云图等密度均匀性超声检测技术。该研究指出研发少峰高频高能超声探头、绝缘子全域超声快速成像、多结构多部位超声检测、去应力处理残余应力测量、密度与残余应力耦合理论等是未来超声检测广泛应用于 GIS/GIL 绝缘子亟待解决的关键技术和基础理论。

关键词：GIS/GIL；超声检测；应力集中；内部集中缺陷；密度不均匀

Status and Prospect of Ultrasonic Detection for GIS/GIL Insulators

HAO Yanpeng[1], LIANG Xuezhi[1], HUANG Shenglong[1], ZHENG Yao[1,2], WANG Guoli[2], GAO Chao[2], ZHOU Fusheng[2]
(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China)

Abstract: The stress concentration, density non-uniformity and internal concentrated defects of GIS/GIL insulators may be the main reasons threatening the safe operation of GIS/GIL. It is urgent to study the detecting methods. The cause and detecting methods of stress concentration, density non-uniformity and internal concentrated defects of GIS/GIL insulators are analyzed in this paper. The research progress of ultrasonic detecting method for epoxy composite materials commonly used in GIS/GIL insulators is systematically summarized, including ultrasonic propagation characteristics such as longitudinal wave velocity, detection depth, sensitivity, first critical angle and longitudinal critical refracted wave penetration depth. The ultrasonic detecting method of stress is introduced including acoustoelastic effect and coefficient of ultrasonic longitudinal critical refracted wave, detecting method of subsurface stress for GIS/GIL insulators by acoustic-distance difference method using longitudinal critical refracted wave and thermal stress nephogram, and detection of parallel stress by longitudinal wave reflection method and vertical stress by longitudinal wave penetration method for three-post insulators. The ultrasonic detecting method of internal concentrated defects is introduced including imaging of internal defects for GIS/GIL insulators by longitudinal wave reflection method, surface defects detection by ultrasonic longitudinal critical refracted wave method and interfacial defects detection by longitudinal wave oblique incidence method. The ultrasonic detecting method of density uniformity is introduced such as density nephogram of basin insulators by longitudinal wave reflection method. The key technologies and basic theories which are widely used in GIS/GIL insulators in the future and need to be solved urgently for ultrasonic detection are as follows: to research and develop ultrasonic probe that is fewer-crest, high-frequency and high-energy, technology of full range ultrasonic fast imaging of insulators, ultrasonic detection of multi structure and multi position , residual stress measurement with stress relief method, and the coupling theory of density and residual stress.

Key words: GIS/GIL; ultrasonic detection; stress concentration; internal concentrated defects; density non-uniformity

基金资助项目：国家自然科学基金委员会–国家电网公司智能联合基金(U1766220)。
Project supported by Smart Grid Joint Fund Key Project Between National Natural Science Foundation of China and SGCC (U1766220).

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备(gas-insulated metal-enclosed switchgear，GIS)是指至少部分采用高于大气压的气体作为绝缘介质的金属封闭开关设备和控制设备[1]。GIS 将变电站的电气元件(变压器除外)，如母线、断路器、隔离开关、电流互感器、电压互感器、母线接地开关、避雷器等全部(至少部分)封闭在充有压力高于大气压的绝缘气体的接地金属压力密闭容器内。因其具有安全性好、可靠性高、不受环境影响、体积小等优点，GIS 自 20 世纪 60 年代以来广泛应用于大城市等场地拥挤地区、地下变电所和山区地势险峻的水电站。

刚性气体绝缘输电线路(rigid gas-insulated transmission line，GIL)是指金属封闭线路，其内绝缘至少部分是通过不同于大气压力空气的绝缘气体实现的，其外壳是接地的[2]。GIL 与 GIS 母线的电气性能相似。相比于架空线路、输电电缆，GIL 具有输送容量大、传输损耗小、安全性高、环境友好、无需无功补偿、应用灵活等优点，广泛应用于高落差、大跨度等特殊环境的大容量长距离输电[3]。

GIS/GIL 导体需要被绝缘子固定在外壳的中心以使得同心管道系统的电场能够均匀分布。GB/T7674—2020《额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备》指出 GIS/GIL 绝缘子分为隔板和支持绝缘子两类[1]。隔板是指把 1 个隔室和其他隔室分开的支持绝缘子。如气密盆式绝缘子，用来分隔气室并把导体固定在外壳上，用于外壳管端部，或者 2 个成对形成封闭气室[4]。隔室是 GIS 或 GIL 的一部分，除了相互连接和控制需要打开外全部封闭。支持绝缘子是指支撑一极或多极导体的内部绝缘子。除了隔板外，支持绝缘子还有单柱型、双柱型或三柱型，以及有孔的非气密盆式绝缘子[4]。

绝缘子起着电气绝缘、隔离气室和支撑导体等作用，直接影响 GIS/GIL 安全运行。根据 40 多年的应用经验，GIL 设计使用寿命通常选择为 50 年[4]，GIL 绝缘子的使用寿命一般>60 年[3]。但是，我国的 GIS/GIL 绝缘子有些远低于设计使用寿命。相关统计表明，GIS 故障中绝缘故障占 38.10%[5]。2020 年 12 月，某地区变电站在对 252 kV GIS 设备进行隐患排查时，共发现涉及 7 个间隔 15 个盆式绝缘子共 19 处裂纹，严重威胁 GIS 设备运行可靠性[6]。与国外相比，我国 GIS/GIL 环氧树脂绝缘子制造技术、生产过程质量控制水平、安装工艺还有差距，应力集中[7-8]、内部集中缺陷[9-10]或密度不均匀[11]等可能是绝缘子故障的重要原因。内部集中缺陷是指内部的气泡和裂纹等，是相对于分布性缺陷如应力集中和密度不均匀而言。

本文以生产、安装和运行中可能出现的上述 3 种缺陷分类分析 GIS/GIL 绝缘子缺陷成因(见第 1 章)，第 2—5 章系统综述了超声检测技术的研究进展，分别为 GIS/GIL 绝缘子环氧材料超声传播特性、GIS/GIL 绝缘子环氧应力超声检测、GIS/GIL 绝缘子内部集中缺陷超声检测和盆式绝缘子密度均匀性超声检测，最后在第 6 章指出发展方向和亟待解决的关键技术与基础理论。

1 GIS/GIL 绝缘子缺陷

1.1 应力集中

GIS/GIL 绝缘子主要由双酚 A 型环氧树脂、酸酐类固化剂和耐受 SF_6 分解物 HF 的无机粉末填料 Al_2O_3 等浇注而成，在制造、运输、安装和运行中内部可能存在残余应力[12]和应力集中[13]。如，因法兰螺栓紧固不均匀的安装工艺不规范导致盆式绝缘子边缘产生初始微裂纹，经长期带电运行、受热胀冷缩等影响，裂纹逐渐扩展，一方面扩展越过密封槽导致气体泄漏，另一方面扩展导致径向贯穿性裂纹，引发局部放电[14]。

目前，国内外通常通过机械试验测试绝缘子的力学特性，如盆式绝缘子水压试验[15]、三支柱绝缘子抗拉、抗弯试验[16-18]等。GB/T7674—2020《额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备》标准规定，隔板型式试验压力应大于 3 倍设计压力，出厂试验应承受试验值为 2 倍设计压力的压力试验 1 min 保持不破损[1]。理论计算盆式绝缘子两侧的最大压力差一般≤0.8 MPa，则盆式绝缘子的破坏压力应≥2.4 MPa[19]。水压破坏试验中缓慢升压至破坏，破坏瞬间水压表读数即为盆式绝缘子的破坏强度。

三相共箱不通孔盆式绝缘子应力分布比单相的复杂，其水压试验强度一直是最关心的技术之一，其金属嵌件周围内应力是水压破坏的根本原因。如果填料粒度、浇注料粘度、固化温度和固化时间等工艺不佳，就易在浇注固化过程中沉降，造成比重分布偏差较大的应力集中点，即水压破坏起始点[20]。

GIS/GIL 绝缘子残余应力或外加荷载造成的应力集中尚无任何检测技术[12]。目前，多用应变片、

光纤光栅测量水压试验盆式绝缘子表面应力[20-22]。对比单相盆式绝缘子破裂前后测量点应力突变时间，确定测试点破裂时刻和测试点破裂顺序，研究起始破裂位置、时间和发展趋势[21]。252 kV 单相盆式绝缘子在水压 3.0 MPa 以下有较好的线弹性力学性能，超过该值应变与外加荷载不成正比，且无重复性；凹面受压，凸面嵌件近处应力小，结构曲面变化最大点即弧线段末端应力集中程度最高，易发生脆性断裂导致破坏，结构设计应避免曲度过大；较大水压下局部径向拉应力超过环氧树脂拉伸强度发生脆性断裂，拉应力是内应力和外加荷载的共同作用，过大的残余应力使整体强度下降[22]。特高压盆式绝缘子环氧氧化铝复合材料拉伸弹性模量约为 13 000 MPa，泊松比约为 0.36，拉伸强度约为 66 MPa，应力应变特性表现为脆性材料，用弹性力学模型建模，用第一强度理论通过第一主应力判断材料破坏；光纤光栅测量水压试验中径向应变由中心导体到法兰逐渐增大，环向应变先增大再减小，靠近中心导体的应变接近 0，起始破裂位置在靠近法兰曲率半径较小的位置[23]。

特高压 1100 kV 国产化研究初期难题之一是机械强度低[24]，试验认为导体与环氧之间界面应力过大是其主要原因[19,24-25]。陈允等围绕金属导体与盆体绝缘材料之间的界面问题进行了大量研究，导体表面喷砂的绝缘子水压强度仅为 2.43 MPa，且分散性大；界面采用环氧类涂层的绝缘子水压强度分散性过大，采用导电橡胶的绝缘子水压强度为 2.75 MPa，且一致性较好，但仍然出现界面破坏现象[19,24-25]。水压破坏试验中，特高压盆式绝缘子的破坏形态主要有两类：一类盆边破坏，中心整体脱落；另一类中心导体剥离，裂纹呈树枝状由中心导体附近向盆边辐射和分叉，即界面问题未解决[24]。按照特高压 GIS 盆式绝缘子材料配方和工艺浇注的、符合标准要求的哑铃型试样测得室温下弹性模量为 13 043.05 MPa、拉伸强度为 73.01 MPa、泊松比为 0.36、断裂伸长率为 0.67%，在材料破坏之前仅有少许屈服行为。测得常温下界面剪切强度为 11.24 MPa，破坏形式主要为界面破坏[24]。现有应力测量技术对界面应力尚不能准确测量，多用仿真研究固化过程中的界面应力和水压试验应力分布。

机械法测量残余应力的环芯法、压痕法等未见用于 GIS/GIL 绝缘子[12]，本课题组正在研究钻孔法测量 GIS/GIL 绝缘子残余应力及外加荷载内应力。

对于三支柱绝缘子，国内外暂无机械性能的测试标准，一般对绝缘子施加径向、轴向荷载来测试抗拉、抗弯能力，考核三支柱绝缘子能否通过某限值，或测量破坏荷载[16-18]。

本课题组试验研究了 GIL 三支柱绝缘子径向荷载下的机械失效过程，指出其断裂前、断裂过程分别属于界面粘附模型、界面剥离模型；无缺陷绝缘子、1 mm 厚脱壳绝缘子和直径 1 mm、高 5 mm 气缝绝缘子径向拉伸破坏荷载分别为 100、28.7 和 95.1 kN，与完好绝缘子相比，脱壳绝缘子、气缝绝缘子破坏强度分别降低了 71.3%、4.9%；半导电层与环氧、嵌件的粘附强度均大于自身破坏强度，无缺陷和气缝绝缘子径向荷载下均断裂在半导电层，脱壳绝缘子断裂在环氧−半导电层界面环氧侧；GIL 三支柱绝缘子径向荷载下的机械失效取决于嵌件曲率最大处环氧的拉伸强度[26]。

除应力集中外，密度不均匀也是影响 GIS/GIL 绝缘子机械性能的重要因素之一。

1.2 密度不均匀

在绝缘子制造过程中，由于 Al_2O_3 粉末粒径不一、混合搅拌不充分、因自身重力发生沉降等，绝缘子内部各个部位 Al_2O_3 含量不同，导致其密度不均匀[11]，较大程度影响了 EP/Al_2O_3 复合材料的弹性模量、泊松比、拉伸强度等机械特性[27-28]。

目前，企业标准推荐用“片析检查”来检测 GIS 盆式绝缘子不同部位环氧复合材料密度[29]，尚无相关的国家标准和团体标准。“片析检查”是对盆式绝缘子指定 8 个位置的 EP/Al_2O_3 复合材料破碎取样后检测密度，密度差别不大于 0.2 g/cm^3 时绝缘子密度均匀性合格。“片析检查”是破坏性试验，检测效率低，且是局部抽样试验，不能反映整个绝缘子材料密度，亟需一种非破坏、检测效率高的盆式绝缘子密度检测方法。

除应力集中和密度不均匀外，内部集中缺陷也会严重影响 GIS/GIL 绝缘子的机械性能和电气性能。

1.3 内部集中缺陷

因制作工艺和长期运行，GIS/GIL 绝缘子可能出现气泡、气缝、脱壳等内部集中缺陷[9,30]。如内部集中缺陷与应力互相影响，在工作电压及运行环境下进一步发展，可能导致绝缘子发生局部放电、闪络等故障[31]。

内部集中缺陷的常见检测技术包括局部放电测量和 X 射线检测等。NB/T42105—2016《高压交

流气体绝缘金属封闭开关设备用盆式绝缘子》标准[15]和 QGDW11127—2013《1100 kV 气体绝缘金属封闭开关设备用盆式绝缘子技术规范》[29]要求：单个盆式绝缘子工频电压局部放电水平不超过 3 pC；出厂试验用X射线检测绝缘子要求高场强区域气孔直径不大于 0.5 mm，其他区域不大于 2 mm。GB/T22383—2017《额定电压 72.5 kV 及以上刚性气体绝缘输电线路》要求在相应于所有试验回路电压下的最大允许局部放电量不应超过 5 pC[2]。现行的绝缘子缺陷检测方法对表面细小裂纹的检测灵敏度不高、无法在线监测预警[31]。

近年来，GIS/GIL 绝缘子无损检测研究受到了科研院所关注。云南电网电科院提出了检测盆式绝缘子裂纹的机械振动方法，当与完好绝缘子振动固有频率最大差值≥15%时判定测试绝缘子有裂纹[32]。天津大学通过重构 GIL 内部介电常数和电场强度空间分布，采用感应电荷层析成像检测 GIL 绝缘子内气隙，研究 GIL 绝缘子缺陷可视化[33]。此外，常用于金属材料应力、均匀性和集中缺陷的超声检测方法，近年来逐渐用于 GIS/GIL 绝缘子环氧复合材料。

2 GIS/GIL 绝缘子环氧材料超声传播特性

超声波是指振动频率高于 20 kHz 的机械波，其频率高、波长短、方向性好、穿透力强，检测范围广，因此广泛应用于无损检测[34]。超声无损检测的常用波形有纵波和临界折射纵波，其传播速度、检测深度和检测灵敏度等超声传播特性与超声波形、频率和介质自身性质等密切相关。

2.1 超声纵波声速

超声纵波在无限大各向同性均匀弹性体内传播时，忽略弹性动力学边界的影响，纵波声速与弹性体特征参数的关系见式(1)[35]。

$$c_{\mathrm{L}}=\sqrt{\frac{E}{\rho}}\sqrt{\frac{1-v}{(1+v)(1-2v)}} \tag{1}$$

式中：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；v 为弹性体的泊松比。几种 GIS/GIL 绝缘子用环氧复合材料的超声纵波速度，见表 1[36-38]。表中，声阻抗 Z 为环氧复合材料密度与声速之积。2 种材料的声阻抗差异越大，在 2 种材料界面反射的超声能量越多。通常用该原理检测环氧复合材料内部的气泡、裂纹等集中缺陷。

2.2 超声纵波检测深度

超声纵波在复合材料中传播时，随传播距离增加能量逐渐衰减。超声频率 f 越大则能量衰减越大，传播深度越小。f 相同时，超声能量(超声仪增益)越大，传播深度越大。

本文制作了 10~90 mm 厚度的 GIS/GIL 环氧复合材料试样，试样间厚度依次差值为 5 mm，不同增益下各频率 f 超声纵波探头反射法的检测深度见表 2。根据反射法与穿透法检测原理可知，穿透法的检测深度理论上为反射法的 2 倍。

2.3 超声纵波检测集中缺陷的灵敏度

超声检测缺陷的灵敏度即检测超声传播路径上缺陷的最小尺寸。当超声在环氧介质中传播时遇到集中缺陷，如气泡、裂纹(内部通常为气体)，尺寸大于检测灵敏度的缺陷会反射超声波，反射波的传播时间与缺陷深度相关，反射波的幅值通常和材料的衰减及缺陷等效反射面积相关，检测反射波形的方法就是超声反射法。没有被缺陷反射的超声波，或者超声波遇到小于灵敏度的缺陷，则继续传播，检测穿透波形的方法就是超声穿透法。传播灵敏度主要受超声探头频率影响。通常，相同条件下超声频率越高灵敏度越高，但是超声衰减也越大，检测深度或传播距离越小[39]。

超声直探头存在盲区。由于超声仪产生的发射脉冲自身具有一定宽度并且放大器存在阻塞现象，靠近始波的一段时间内无法检测缺陷，这段时间所

表 1 GIS/GIL 绝缘子常用环氧复合材料超声纵波声速

Table 1 Ultrasonic longitudinal wave velocity of epoxy composite materials commonly used for GIS/GIL insulators

绝缘子类型	ρ/(g·cm^{-3})	E/GPa	c_{L}/(m·s^{-1})	Z/(g·(cm^2·s)$^{-1}$)
某 252 kV GIS 盆式 A	2.23	12.25	3090	0.66×10^{-6}
某 252 kV GIS 盆式 B			3000	
某 550 kV 三支柱			2997	

表 2 GIS/GIL 绝缘子常用环氧复合材料的超声纵波反射法检测深度

Table 2 Detection depth of epoxy composite materials commonly used for GIS/GIL insulators by ultrasonic longitudinal wave reflection method

f/MHz	检测深度/mm		
	15 dB	20 dB	25 dB
1.0	80	90	>90
1.5	50	55	70
2.5	20	25	35
5.0	10	15	20

对应的由入射面进入检测试样的深度距离为检测盲区。由于盲区和声衰减的原因，不同频率超声纵波直探头的检测范围存在上限、下限。

本文用不同频率的超声纵波检测环氧复合材料中直径ϕ=1 mm 的气泡，气泡的深度范围见表 3。由表 3 可知，超声纵波频率越低，检测缺陷的深度及深度范围越大，但检测灵敏度越低。例如 1 MHz 超声纵波检测不到ϕ=1 mm 的气泡，而 1.5 MHz 以上的能检测。

2.4 超声第一临界角与超声临界折射纵波

当超声纵波 L 以第一临界角 θ_{CR} 从介质 1(如有机玻璃)入射至介质 2(如环氧)时，在介质 2 中一定深度内折射出临界折射纵波(L_{CR} 波)，见图 1[36]。L_{CR} 波可以检测该深度(也称渗透深度 H)内的应力和缺陷。第一临界角 θ_{CR} 和渗透深度 H 是超声临界折射纵波检测方法的两个重要指标。

GIS/GIL 绝缘子常用环氧复合材料的超声纵波速度 v_{Le}、探头有机玻璃的超声纵波速度 v_{Lg} 和第一临界角 θ_{CR} 见表 4[36-37]。

2.5 超声临界折射纵波渗透深度

L_{CR} 波仅在介质表面下一定深度内传播，该深度为 L_{CR} 波的渗透深度 H，见图 2。在有限厚度弹性体中传播时，L_{CR} 波渗透深度是其频率的函数。频率 f 越低的超声临界折射纵波在 GIS/GIL 环氧复合材料中的渗透深度 H 越大，见式(2)[40]。

$$H = 38.26 \times 0.46^{f} \tag{2}$$

式(2)为 $H = K_1 \cdot B^{f}$ 方程，参数 K_1、B 仅与环氧树脂、Al_2O_3 填料和固化剂有关，相同材料配方体系 GIS 绝缘子的 K_1、B 不变。某 252 kV GIS 单相盆式绝缘子密度 ρ 为 2.26 g/cm³，弹性模量 E 为 12.7 GPa，泊松比 v 为 0.31，2.5 和 1 MHz L_{CR} 波的渗透深度约为 4 和 17 mm[40]。

3 GIS/GIL 绝缘子环氧应力超声检测

3.1 次表面应力超声 L_{CR} 波检测

3.1.1 超声 L_{CR} 波的声弹性效应

应力的超声检测原理基于超声声速随应力变化的声弹性效应。单轴应力下超声 L_{CR} 波声弹性效应的研究基于固定传播距离 L_1 内 L_{CR} 波传播时间随应力线性变化的原理。通过测量距离 L_1 内 L_{CR} 波传播时间，可检测表面下一定深度范围内的应力，如式(3)所示[41]。

表 3 不同频率超声纵波反射法检测ϕ=1 mm 的气泡的深度范围

Table 3 Depth range of 1-mm diameter bubbles detected by ultrasonic longitudinal wave reflection method with different frequencies

f/ MHz	1	1.5	2.5	5
缺陷深度范围/ mm		25~40	15~20	3~5

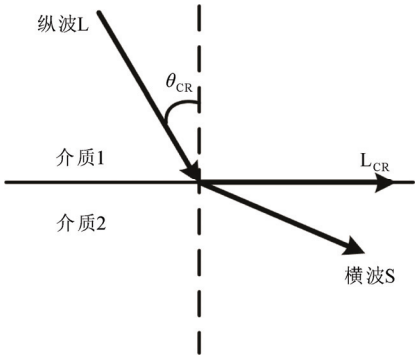


图 1 超声临界折射纵波产生原理图

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic longitudinal critical refracted wave generation

表 4 GIS/GIL 绝缘子常用环氧复合材料和探头有机玻璃的超声纵波声速及其第一临界角 θ_{CR}

Table 4 Ultrasonic longitudinal wave velocity and its first critical angle θ_{CR} of epoxy composite commonly used for GIS/GIL insulators and that of probe plexiglass

类型	v_{Le}/(m·s⁻¹)	v_{Lg}/(m·s⁻¹)	θ_{CR}/(°)
某 252 kV GIS 盆式 A	3090	2730	63.0
某 252 kV GIS 盆式 B	3000	2700	65.5

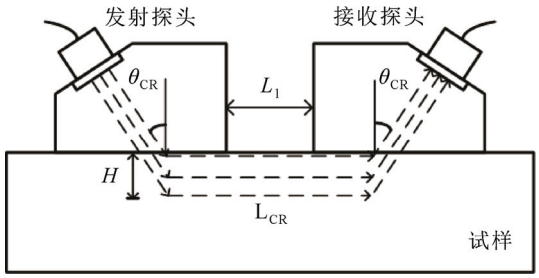


图 2 超声 L_{CR} 波传播渗透深度示意图

Fig.2 Schematic diagram of penetrating depth of ultrasonic L_{CR} wave

$$\mathrm{d}\sigma = \frac{E}{KT_0}\mathrm{d}T \tag{3}$$

式中：dσ为应力变化量，表示加载应力下应力 σ 与零应力 σ_0 之差，MPa；dT 为传播时间变化量，表示

加载应力下传播时间 T 与零应力下传播时间 T_0 之差，μs；K 为声弹性系数，表示声弹性效应中超声传播时间或传播速度对应力的敏感度，与材料弹性常数、超声波波形和超声频率有关[42]。

3.1.2 次表面应力声弹性系数

次表面应力指被测物体表面下一定深度范围内平行于表面的平均应力。文献[36]提出了 GIS 环氧复合材料超声 L_{CR} 波声弹性系数测量方法，2.5 MHz 超声 L_{CR} 波检测环氧复合材料试样 0~50 MPa 机械压缩荷载下的声弹性系数为–4.95，比碳纤维环氧复合材料中当超声 L_{CR} 波沿碳纤维方向传播时的拉伸应力声弹性系数–12.67 的绝对值要小很多[43]。

当 2.5 MHz 探头间距为 3 cm 时，0~50 MPa 拉伸应力下的环氧复合材料中的超声 L_{CR} 波传播时间减小了 0.852 μs，约为外加荷载为 0 时 40.738 μs 的 2.09%；当同频率 2.5 MHz 探头间距为 4.5 cm 时，0~70 MPa 垂直应力下的环氧复合材料中的超声 L_{CR} 波传播时间减小了 0.025 μs，约为外加荷载为 0 时 15.708 μs 的 0.16%[44]。GIS 环氧复合材料中平行应力方向传播的超声纵波应力检测灵敏度比垂直应力方向的传播的较高。

3.1.3 GIS 环氧试样次表面应力检测

根据式(3)的应力检测原理与上述声弹性系数–4.95，文献[36]采用超声 L_{CR} 波检测了 GIS 环氧复合材料试样的次表面机械应力 σ_a，检测示意图见图 2。通过测量初始零应力、应力状态下的传播时间 T_0、T，可得检测应力 σ_c。超声检测的次表面应力最大绝对误差在加载应力为 45 MPa 时为 4.05 MPa，最大相对误差在加载应力为 10 MPa 时为 13.12%[36]。

3.2 盆式绝缘子次表面热应力 L_{CR} 波声程差检测

由于中心嵌件、环氧复合材料及法兰环热膨胀系数不同，GIS/GIL 盆式绝缘子存在因温度梯度引起的热应力。热应力即无外力作用时，物体经受温度变化不能自由伸缩或内部各部分间相互约束产生的应力[45]。超声 L_{CR} 波检测的是 L_1 内次表面应力的平均值，L_1 越小则次表面应力越接近某位置次表面分布应力真值。

文献[40]提出了 L_1=2 mm 的盆式绝缘子次表面热应力超声 L_{CR} 波声程差检测方法，提高了应力检测的准确性。用该方法 2.5 MHz 超声 L_{CR} 波检测某 252 kV 单相盆式绝缘子在中心嵌件 50、70、90、110 ℃下 9 mm 深次表面周向热应力，表明：绝缘子次表面周向热应力均为拉伸应力，中心嵌件周围环氧热应力最大，沿径向先减小后增大呈 V 字型变化；热应力随着中心嵌件温度升高而增大，110 ℃时最大热应力为 5.19 MPa，8 个径向方向各 6 个检测位置的热应力通过 3 次样条插值绘制出盆式绝缘子热应力分布云图，中心嵌件 110 ℃时盆式绝缘子周向热应力见图 3[40]，试验与仿真趋势一致。

3.3 垂直应力的超声纵波穿透法检测

3.3.1 超声纵波的声弹性效应

在固体内施加单轴应力的情况下，纵波声弹性方程见式(4)，中国工程物理研究院基于式(4)研究了聚合物粘结炸药(polymer bonded explosive，PBX)的压缩应力[46]。

$$\frac{V-V_0}{V_0}=K\left(\sigma-\sigma_0\right) \tag{4}$$

式中：V_0 为零应力下超声纵波速度；σ_0 为零应力；V 为应力状态下超声纵波速度；σ 为应力状态下超声传播区域内应力平均值。

3.3.2 GIS 环氧复合材料垂直压缩应力声弹性系数

现有单轴应力下超声应力检测研究大多利用反射法，而 GIS 环氧复合材料超声衰减较大、绝缘子较厚，适合采用穿透法。

超声纵波穿透法测量垂直应力声弹性系数时，垂直应力下环氧复合材料在超声传播方向上会发生形变，改变了超声传播方向的声程。而超声在探头中从压电晶片到探头表面等系统延时也会影响超声在声程中的传播时间。环氧复合材料垂直应力声弹

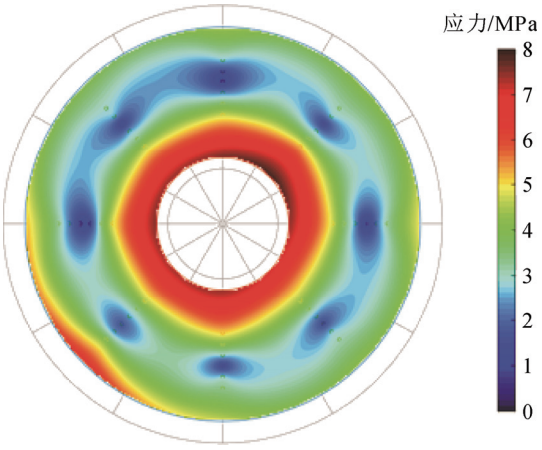


图 3 超声 L_{CR} 波检测某 252 kV 单相盆式绝缘子在中心导体 110 ℃时的周向热应力分布云图

Fig.3 Nephogram of circumferential thermal stress distribution of 252 kV single phase basin insulator detected by ultrasonic L_{CR} wave when the temperature of insert is 110 ℃

性系数的测量受形变和系统延时的影响。文献[44]研究了 GIS/GIL 环氧复合材料在 0~70 MPa 垂直压应力时计延时计应变、不计延时计应变、不计应变计延时下的声弹性系数，见表 5，GIS/GIL 环氧复合材料在计延时计应变情况下的垂直压缩应力声弹性系数为 4.556×10^{-5} MPa^{-1}。

文献[38]测量了某 550 kV GIL 三支柱绝缘子用环氧复合材料在 0~50 MPa 垂直压缩应力下不计应变的声弹性系数，50 MPa 应力下声速仅变化 14 m/s，声弹性系数为 8.908×10^{-5} MPa^{-1}。

3.3.3 GIS 环氧复合材料垂直压缩应力检测

文献[44]提出了 GIS/GIL 绝缘子环氧垂直压缩应力的超声纵波检测穿透法。根据式(4)的应力检测原理与上述声弹性系数 4.556×10^{-5} MPa^{-1}，测量 GIS 环氧复合材料的 0~70 MPa 机械压缩垂直应力。考虑超声检测系统延时 0.526 μs 和 70 MPa 应力时伸应变为 0.001 97，当应力>50 MPa 时，E_a<3.8 MPa，E_r<6.2%。

3.4 三支柱柱腿环氧应力的超声纵波检测

根据超声声程方向与应力方向间的关系，声弹性系数分为垂直应力声弹性系数、平行应力声弹性系数。

3.4.1 平行压缩应力声弹性系数

平行应力声弹性系数测量时超声纵波探头放置困难。文献[38]提出了二差法测量环氧复合材料的平行压缩应力声弹性系数，解决了探头放置困难的问题，并消除了试样在应力下形变引起误差的影响：测量相同荷载下不同厚度试样的超声传播时间，试样厚度差与超声传播时间差之比为该应力下超声纵波声速，并计算平行压缩应力声弹性系数。平行压缩应力声弹性系数为 4.477×10^{-4} MPa^{-1}，比垂直压缩应力声弹性系数大 1 个数量级，较灵敏。

3.4.2 柱腿径向/轴向应力检测

根据式(4)与垂直、平行压缩应力声弹性系数，文献[38]用 2.5 MHz 超声纵波分别以穿透法、反射法检测 550 kV GIL 三支柱柱腿嵌件底部下方 5 mm 处环氧的径向荷载垂直应力、柱腿端部侧下方 5 mm 处嵌件外围环氧的轴向荷载平行应力，超声穿透法能检测 0~50 kN 径向荷载下柱腿直径约 73.15 mm(厚)环氧内部应力变化，0~30 kN 最大偏差为 2.91 MPa，与仿真相比检测误差为 19.79%；超声反射法能够检测 0~5 kN 轴向荷载下柱腿嵌件外部环氧内部应力变化。

4 GIS/GIL 绝缘子内部集中缺陷超声检测

GIS/GIL 绝缘子气泡、裂纹、脱壳等内部集中缺陷处存在环氧−空气界面。由于环氧、空气的声阻抗差异大，一定频率的超声纵波会在大于其灵敏度尺寸的缺陷界面处反射，通过界面反射波可以检测 GIS/GIL 绝缘子内部集中缺陷[47]。

4.1 内部缺陷超声纵波反射法检测

文献[48]提出了检测 GIS 环氧复合材料内部缺陷的超声纵波反射法，见图 4，在环氧复合材料试样上检测了不同尺寸的气泡和裂缝并确定了缺陷的深度。图 4 中 d_v、d_c 和 d_B 分别表示气泡深度、裂缝深度和试样厚度。检测气泡时反射波幅值与气泡深度和气泡尺寸有关，1 MHz 超声纵波可以检测深度 50 mm 内 ϕ>2 mm 的气泡，深度误差<0.32%，但 ϕ=1 mm 的气泡检测困难；检测内部裂纹时反射波幅值与裂纹取向及宽度有关，相同宽度的裂纹横向反射波幅值最大，竖向次之，斜向最小，1 MHz 超声纵波可以检测深度 40 mm 内时宽度为 2 mm 的不同取向裂纹和宽度为 1 mm 的横向裂纹。

4.2 表面微裂纹的超声临界折射纵波检测

文献[37]提出了 GIS/GIL 绝缘子表面微裂纹超

表 5 GIS 环氧复合材料中传播方向垂直于应力的超声纵波声弹性系数 K

Table 5 Acoustic elastic coefficient K of ultrasonic longitudinal wave propagating perpendicular to stress in GIS epoxy composite

测量方式	计延时计应变	不计延时计应变	不计应变计延时
K/(10^{-5} MPa^{-1})	4.556	4.421	1.916

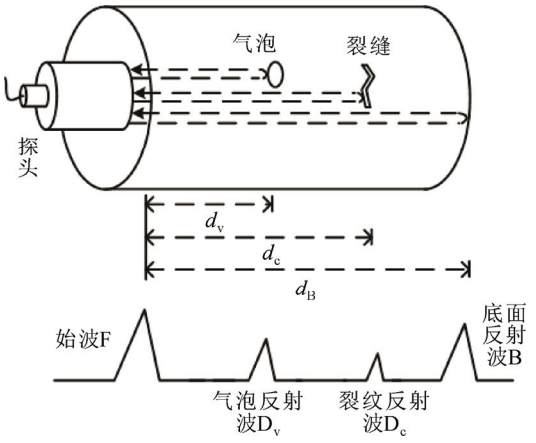


图 4 内部缺陷超声纵波反射法检测原理图

Fig.4 Schematic diagram of detecting method for internal defects by ultrasonic longitudinal wave reflection method

声临界折射纵波检测方法，并用单探头、双探头检测了横向、竖向和斜向的表面微裂纹。2.5 MHz L_{CR} 波可以检测 0.5~2.0 mm 表面微裂纹。单探头检测时调整探头声程方向，出现反射波表示该声程上存在竖向微裂纹，反射波幅值随裂纹深度增加而线性增大；双探头间距 15 mm 检测时，接收波幅值减小表明声程上有表面微裂纹，接收波幅值随裂纹深度增加而线性减小。两种方法相比，单探头较准确，双探头受裂纹取向影响较小。

4.3 界面缺陷的超声斜反射检测

文献[49]建立了 GIS 三相共箱盆式绝缘子嵌件–环氧界面超声斜反射模型，提出了 2 个超声纵波探头一发一收斜反射检测方法，见图 5，根据反射波幅值和传播时间可定位检测界面缺陷。用 2.5 MHz 超声纵波检测 126 kV 盆式绝缘子三相嵌件–环氧界面缺陷，将接收波幅值与位置绘制成三维图像。缺陷在三维图像的投影尺寸约为 4 mm×6 mm。

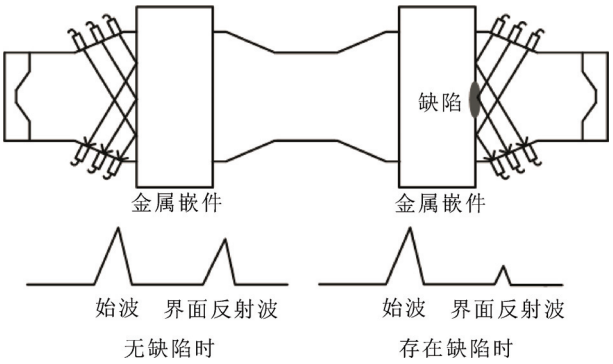


图 5 GIS 三相共箱盆式绝缘子嵌件–环氧界面超声斜反射检测示意图

Fig.5 Schematic diagram of ultrasonic oblique reflection detection for the interface of epoxy insulation and metal insert of GIS three-phase insulator

5 盆式绝缘子密度均匀性超声检测

根据式(1)可知，弹性体中的纵波声速 c_L 取决于材料的密度 ρ、弹性模量 E 和泊松比 v。对于一定配方的环氧复合材料体系，E 和 v 均与 ρ 相关，即环氧复合材料内 c_L 与 ρ 存在函数关系。

文献[50]提出了检测盆式绝缘子密度均匀性的超声纵波反射法，揭示了 GIS/GIL 环氧复合材料的密度–声速方程 $\rho = 0.0014c_L - 1.734$，将各测量位置超声检测数据通过三次样条插值法得到了 126 kV 盆式绝缘子密度云图[50]，见图 6，直观、数字化地展示了从浇注口到盆子底部的无机填料沉降等造成的密度分布情况。该盆式绝缘子密度最大相差 0.11 g/cm³，满足不大于 0.2 g/cm³ 的标准要求。绝缘子底部边缘和下端导体嵌件上部密度较大，最大为 2.36 g/cm³。绝缘子顶部两侧边缘和上端导体嵌件底部密度较小，最小为 2.25 g/cm³。该超声纵波反射法为 GIS 盆式绝缘子提供了一种密度均匀性无损地数字化检测方法。

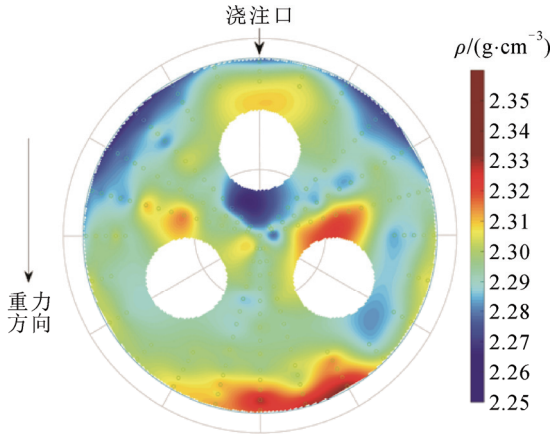


图 6 超声反射法检测 126 kV 盆式绝缘子密度分布云图

Fig.6 Density distribution nephogram of 126 kV basin insulator detected by ultrasonic reflection method

6 结论与展望

GIS/GIL 绝缘子试验、检测技术目前已不能满足电力设备高质量制造和智能化运维的需要。与 X 射线检测相比，在出厂试验、现场运行事故分析等应用场景中超声检测 GIS/GIL 绝缘子方便、安全、高效、准确、灵敏，既可检测缺陷，还可以检测应力和密度均匀性；与局部放电检测相比，超声检测可快速检测、准确定位缺陷。超声无损检测 GIS/GIL 绝缘子越来越受到关注，本文指出未来发展方向有以下几方面。

1）研发少峰高频高能超声探头

超声检测最重要的参数是传播时间，即超声发射波的时刻、缺陷反射波的时刻，或底面反射波的时刻。由发射波时刻和缺陷反射波时刻之差可计算缺陷深度，由发射波时刻和底面反射波时刻之差可计算传播速度等。因此超声传播波形峰值时刻若读取不准确将增大测量误差。目前超声探头的发射波、反射波或透射波的波形上常有 4—8 个振荡峰[50]，超声增益越大则峰个数越多，准确读取峰值时刻就越困难。如果研发性能好的少峰超声探头，如对激

励脉冲的响应仅为一个半周期的超声复合材料探头[51]，就仅有一个正峰值，可以准确读取上述几个重要时刻，以准确测量传播时间。

此外，目前的 1.5~5 MHz 超声直探头实现了检测 GIS/GIL 绝缘子 1 mm 气泡。若要检测更小的缺陷，如标准中提出的高场强区域直径不大于 0.5 mm 的气孔，就得提高超声频率，研发高频超声探头。

另一方面，目前的 1.5 MHz 超声探头检测 GIS/GIL 绝缘子的深度范围约为 25~40 mm，若用于检测典型绝缘子的厚度或三支柱绝缘子柱腿直径约为 80 mm，就需要提高超声探头的能量。若降低频率也可以提高检测深度，但同时检测灵敏度也会下降。当然，鉴于不同频率的超声探头有一定的检测灵敏度和检测深度范围，配合使用多频率的高能探头可以实现覆盖全部绝缘子厚度或支柱绝缘子直径范围的超声检测。

2）GIS/GIL 绝缘子全域超声快速成像

目前已实现了 GIS/GIL 绝缘子超声应力云图和密度云图等人工测量，直观性好，但测量时间较长，熟练技术人员通常需要 1 d，还需要将有限测量点的数据通过数学插值法得到全域云图。若超声探头能融合位置或位移等传感器，超声信息与位置信息融合进行绝缘子全域检测数据的自动记录和显示[51]，将大大提高超声检测的工作效率和准确性，实现应力、密度均匀性二维云图和含有集中缺陷绝缘子的三维云图成像。

3）多结构多部位超声检测方法

GIS/GIL 绝缘子型式多，结构各异，有多个典型部位。除了盆式、三支柱，还有绝缘拉杆等圆筒状。而超声直探头尺寸常为ϕ≈1.5 cm、高约 5 cm，还可以制作得更小，以方便放在各种结构各种局部部位的表面，也可以借助楔块与曲面耦合。此外超声检测方法多样，如超声纵波反射法和透射法、超声临界折射纵波法、横波法、纵横波结合法和导波法等。虽然也有相控阵等成熟的超声检测技术，但并不适合用于处于研究阶段的 GIS/GIL 绝缘子超声检测，更需要从基本单脉冲超声原始传播波形来研究其基本传播特性和传播规律，在此基础上形成 GIS/GIL 绝缘子专用的检测探头、检测方法和检测软件。超声检测 GIS/GIL 绝缘子近年来受到越来越多的关注，适合多结构、多部位的超声检测更值得探索和研究。

4）去应力处理残余应力测量

超声临界折射纵波法检测透声性良好的金属和非金属固体材料或构件内的残余应力和荷载应力已有国家标准[52]。通过零应力处理得到零应力试块以便测量零应力下超声传播时间，如式(3)中 T_0。T_0 是残余应力测量的核心参数。钢件可以用去应力退火处理[53]、金属件可用振动时效去应力处理[54]获得零应力试块。GIS/GIL 绝缘子常用环氧复合材料试块去应力处理方法还未见报道，目前其残余应力都为仿真结果，其大小在 MPa 数量级。

5）密度与残余应力耦合理论

目前密度均匀性超声检测云图实质是密度分布和密度不均匀引起残余应力共同作用的结果。对于密度不均匀及其引起的残余应力的耦合理论，工程中是否需要将两者解耦仍有待深入研究。

参考文献 References

[1] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备：GB/T 7674—2020[S]. 北京：中国标准出版社，2020.
State Administration of Market Supervision and Administration, National Standardization Administration. Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages of 72.5 kV and above: GB/T 7674—2020[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2020.

[2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 额定电压 72.5 kV 及以上刚性气体绝缘输电线路：GB/T 22383—2017[S]. 北京：中国标准出版社，2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. Rigid gas-insulated transmission lines for rated voltages of 72.5 kV and above: GB/T 22383—2017[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2017.

[3] 齐 波，张贵新，李成榕，等. 气体绝缘金属封闭输电线路的研究现状及应用前景[J]. 高电压技术，2015，41(5)：1466-1473.
QI Bo, ZHANG Guixin, LI Chengrong, et al. Research status and prospect of gas-insulated metal enclosed transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1466-1473.

[4] 科 赫 H. 气体绝缘输电线路[M]. 沈 威，杨思民，杨建军，译. 北京：机械工业出版社，2016.
KOCH H. Gas-insulated transmission lines[M]. SHEN Wei, YANG Simin, YANG Jianjun, translated. Beijing, China: China Machine Press, 2016.

[5] 崔杨柳，马宏忠，王涛云，等. 基于故障树理论的 GIS 故障分析[J]. 高压电器，2015，51(7)：125-129，135.
CUI Yangliu, MA Hongzhong, WANG Taoyun, et al. Fault analysis of GIS based on fault tree theory[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 125-129, 135.

[6] 文雅钦，吴传奇，潘章达，等. GIS 盆式绝缘子开裂原因分析及处理措施[J]. 湖北电力，2021，45(4)：40-46.
WEN Yaqin, WU Chuanqi, PAN Zhangda, et al. Cause analysis and treatment measures of GIS basin-type insulator cracking[J]. Hubei Electric Power, 2021, 45(4): 40-46.

[7] 刘 通，李洪涛，刘建军，等. 一起 GIS 盆式绝缘子应力开裂导致绝缘击穿故障[J]. 高压电器，2020，56(2)：240-245.

LIU Tong, LI Hongtao, LIU Jianjun, et al. Insulation breakdown fault caused by stress crack of GIS basin-type insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 240-245.

[8] 庄　丞，袁传镇，曾建斌. 表面应力分布对 252 kV GIS 盆式绝缘子机械性能影响的研究[J]. 电磁避雷器，2020(2)：183-188.
ZHUANG Cheng, YUAN Chuanzhen, ZENG Jianbin. Study on influence of surface stress distribution on mechanical properties of 252 kV GIS basin insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(2): 183-188.

[9] 何宁辉，李秀广，周　秀，等. GIS 固体绝缘不同类型气隙缺陷的放电特征[J]. 高电压技术，2021，47(6)：2073-2083.
HE Ninghui, LI Xiuguang, ZHOU Xiu, et al. Discharge characteristics of different types of void defects of solid insulation of GIS[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2073-2083.

[10] 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.

[11] LIANG H C, DU B X, LI J, et al. Mechanical stress distribution and risk assessment of 110 kV GIS insulator considering Al_2O_3 settlement[J]. High Voltage, 2019, 4(1): 65-71.

[12] 苏　耕，伍维健，周　峻，等. 残余应力测试方法在 GIS 盆式绝缘子中的应用前景[J]. 绝缘材料，2017，50(3)：1-5.
SU Geng, WU Weijian, ZHOU Jun, et al. Application prospect of residual stress measurement in GIS basin-type insulators[J]. Insulating Materials, 2017, 50(3): 1-5.

[13] 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.

[14] 葛志成，董冠良，林　琛，等. 500 kV GIS 盆式绝缘子故障原因分析与处理[J]. 吉林电力，2019，47(4)：47-49.
GE Zhicheng, DONG Guanliang, LIN Chen, et al. Cause analysis and treatment of 500 kV GIS basin insulator fault[J]. Jilin Electric Power, 2019, 47(4): 47-49.

[15] 国家能源局. 高压交流气体绝缘金属封闭开关设备用盆式绝缘子：NB/T 42105—2016[S]. 北京：中国电力出版社，2016.
National Energy Administration. Basin insulator for high-voltage alternating current gas-insulated metal-enclosed switchgear: NB/T 42105—2016[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2016.

[16] 刘泽洪，王承玉，路书军，等. 苏通综合管廊工程特高压 GIL 关键技术要求[J]. 电网技术，2020，44(6)：2377-2385.
LIU Zehong, WANG Chengyu, LU Shujun, et al. Key technical parameters of UHV GIL in Sutong utility tunnel project[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2377-2385.

[17] 汪建成，谢文刚，宫瑞磊，等. 550 kV GIL 三支柱绝缘子设计[J]. 高压电器，2018，54(5)：114-118.
WANG Jiancheng, XIE Wengang, GONG Ruilei, et al. Design of 550 kV GIL three post insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5): 114-118.

[18] HUANG R D, GAO C, ZHOU F S, et al. Study on electrical characteristics of 550 kV GIL three-post insulator after mechanical load tests[C]//The 2nd International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the Era of Artificial Intelligence. Nanjing, China: IEEE, 2021: 1-4.

[19] 陈　允，崔博源，王宁华，等. 1100 kV 气体绝缘开关设备用盆式绝缘子中心嵌件结构设计[J]. 高电压技术，2016，42(2)：564-570.
CHEN Yun, CUI Boyuan, WANG Ninghua, et al. Structural design of central insert in basin-type insulator used for 1100 kV GIS[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2): 564-570.

[20] 费龙菲，龚晓燕，陈　维. GIS/GCB 用三相盆式绝缘子水压强度的影响因素分析[J]. 高压电器，2014，50(4)：125-130.
FEI Longfei, GONG Xiaoyan, CHEN Wei. Factors influencing the water pressure of insulating spacer in GIS/GCB[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 125-130.

[21] 施毅舟，张　欣，李西育，等. 基于应力应变分析的盆式绝缘子破裂趋势判断方法研究[J]. 电瓷避雷器，2015(2)：19-22，30.
SHI Yizhou, ZHANG Xin, LI Xiyu, et al. Judgment method of basin insulator rupture process based on the analysis of stress and strain[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(2): 19-22, 30.

[22] 吴昱怡，王承玉，陈　允，等. 盆式绝缘子力学性能测试及分析[J]. 电瓷避雷器，2017(1)：132-137.
WU Yuyi, WANG Chengyu, CHEN Yun, et al. Test and analysis on mechanical properties of 252 kV basin-type insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(1): 132-137.

[23] 郭子豪，王浩然，李　禾，等. 特高压盆式绝缘子水压试验中应力应变分布的仿真计算与光纤测量[J]. 高电压技术，2018，44(3)：993-1002.
GUO Zihao, WANG Haoran, LI He, et al. Calculation and experimental study on strain and stress distribution of UHV GIS spacer during hydrostatic test[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 993-1002.

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

[25] 陈　允，崔博源，王宁华，等. 1100 kV 盆式绝缘子改善机械强度的研究[J]. 高压电器，2015，51(7)：52-56，62.
CHEN Yun, CUI Boyuan, WANG Ninghua, et al. Study of improving mechanical strength for 1100 kV Spacer Insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 52-56, 62.

[26] HAO Y P, ZHENG Y, LIU L, et al. Failure mechanism of three-post insulators in the GIL under radial loads[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 127: 105545.

[27] NAOUS W, YU X Y, ZHANG Q X, et al. Morphology, tensile properties, and fracture toughness of epoxy/Al_2O_3 nanocomposites[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2006, 44(10): 1466-1473.

[28] BAZRGARI D, MOZTARZADEH F, SABBAGH-ALVANI A A, et al. Mechanical properties and tribological performance of epoxy/Al_2O_3 nanocomposite[J]. Ceramics International, 2018, 44(1): 1220-1224.

[29] 中国人民共和国国家电网公司. 1100 kV 气体绝缘金属封闭开关设备用盆式绝缘子技术规范：Q/GDW 11127—2013[S]. 北京：国家电网公司，2013.
State Grid Corporation of the People's Republic of China. Specifications for basin insulator used in 1100 kV gas-insulated metal-enclosed switchgear: Q/GDW 11127—2013[S]. Beijing, China: State Grid Corporation of China, 2013.

[30] UETA G, WADA J, OKABE S, et al. Insulation characteristics of epoxy insulator with internal crack-shaped micro-defects-fundamental study on breakdown mechanism[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(4): 1444-1451.

[31] 汪晓明，何　萍，刘　衍，等. 一起 500 kV HGIS 事故的分析及处理[J]. 高压电器，2014，50(1)：129-132.

WANG Xiaoming, HE Ping, LIU Yan, et al. Analysis and treatment of a 500 kV hybrid gas insulated switchgear accident[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 129-132.

[32] 刘荣海，臧春艳，杨迎春，等. 盆式绝缘子开裂故障的无损检测技术研究[J]. 高压电器，2019，55(3)：139-143.
LIU Ronghai, ZANG Chunyan, YANG Yingchun, et al. Non-destructive testing technology of the cracking failure of the basin-type insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3): 139-143.

[33] LIANG H C, DU B X, LI J. Electric field reconstruction inside gas insulated transmission line by induced charge tomography[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(4): 1372-1375.

[34] ROSSINI N S, DASSISTI M, BENYOUNIS M Y, et al. Methods of measuring residual stresses in components[J]. Materials & Design, 2012, 35: 572-588.

[35] PANAKKAL J P, GHOSH J K, ROY P R. Use of ultrasonic velocity for measurement of density of sintered fuel pellets[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1984, 17(9): 1791.

[36] ZOU Z Y, HAO Y P, ZHENG Y, et al. Subsurface stress measurement in GIS epoxy composite by using LCR waves[J]. Energies, 2020, 13(14): 3725.

[37] 田方园，郝艳捧，邹舟诣奥，等. 环氧复合绝缘表面微裂纹检测的超声临界折射纵波法[J]. 广东电力，2019，32(12)：106-112.
TIAN Fangyuan, HAO Yanpeng, ZOU Zhouyiao, et al. Ultrasonic LCR method for detecting micro-cracks on the surface of epoxy composite insulation[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(12): 106-112.

[38] 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.

[39] KUMAR A, ARNOLD W. High resolution in non-destructive testing: a review[J]. Journal of Applied Physics, 2022, 132(10): 100901.

[40] HAO Y P, ZHENG Y, HE W M, 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: 6001009.

[41] MOHAMMADI M, FESHARAKI J J. Determination of acoustoelastic/acoustoplastic constants to measure stress in elastic/plastic limits by using LCR wave[J]. NDT & E International, 2019, 104: 69-76.

[42] ABBASI Z, OZEVIN D. Acoustoelastic coefficients in thick steel plates under normal and shear stresses[J]. Experimental Mechanics, 2016, 56(9): 1559-1575.

[43] DOS SANTOS A A, AMBIEL L B, GARCIA R H, et al. Stress analysis in carbon/epoxy composites using L_{CR} waves[J]. Journal of Composite Materials, 2014, 48(27): 3425-3434.

[44] ZOU Z Y, HAO Y P, TIAN F Y, et al. An ultrasonic longitudinal through-transmission method to measure the compressive internal stress in epoxy composite specimens of gas-insulated metal-enclosed switchgear[J]. Energies, 2020, 13(5): 1248.

[45] 温崇哲. 热工及热应力基础[M]. 北京：机械工业出版社，1983：90-91.
WEN Chongzhe. Foundation of thermal engineering and thermal stress[M]. Beijing, China: China Machine Press, 1983: 90-91.

[46] XU Y, YANG Z F, ZHOU H Q, et al. Application of acoustoelasticity in studying compressive stress state in polymer bonded explosive[C]// 2015 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum. Zhuhai, China: IEEE, 2015: 95-99.

[47] GROEGER J H, ALLEN A, BRAUN J M. Applications of ultrasonic NDE techniques for location and characterization of defects in epoxy composite GIS spacers[C]//IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Toronto, Canada: IEEE, 1990: 443-448.

[48] TIAN F Y, HAO Y P, ZOU Z Y, et al. An ultrasonic pulse-echo method to detect internal defects in epoxy composite insulation[J]. Energies, 2019, 12(24): 4804.

[49] 何伟明. GIS 盆式绝缘子界面缺陷与热应力超声检测方法研究[D]. 广州：华南理工大学，2021.
HE Weiming. Research on ultrasonic testing method for interface defect and thermal stress of GIS basin insulator[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2021.

[50] ZHENG Y, HAO Y P, LIU L, 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: 6010308.

[51] 郝艳捧. 基于低频超声反射法检测技术的大电机主绝缘状态诊断和寿命评估[D]. 西安：西安交通大学，2003.
HAO Yanpeng. Assessment of insulation condition and reliable life of large generator stator insulation based on low-frequency ultrasonic pulse-echo techniques[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2003.

[52] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 无损检测 残余应力超声临界折射纵波检测方法：GB/T 32073—2015[S]. 北京：中国标准出版社，2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China National Standardization Administration. Non-destructive testing-test method for measuring residual stress using ultrasonic critical refracted longitudinal wave: GB/T 32073—2015[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2015.

[53] 国家标准化管理委员会. 钢件的正火与退火：GB/T 16923—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2008.
National Standardization Management Committee. Normalizing and annealing of steel parts: GB/T 16923—2008[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2008.

[54] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 振动时效工艺参数选择及效果评定方法：GB/T 25712—2010[S]. 北京：中国标准出版社，2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. Vibratory stress relief technology-parameter selection and effect evaluation methods: GB/T 25712—2010[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2010.



郝艳捧(通信作者)
1974—，女，博士，教授，博导
主要从事输电设备状态感知技术，污秽、覆冰、雷电下输变电设备外绝缘安全，介质阻挡放电、沿面放电、局部放电等气体放电理论研究
E-mail: yphao@scut.edu.cn

HAO Yanpeng
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2022-09-26 修回日期 2023-01-13 编辑 曾文君