第 52 卷 第 5 期：2131-2138 高电压技术 Vol.52, No.5: 2131-2138
2026 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251454

GIS 外施激振耐压试验方法及对潜伏性异物检测有效性研究

杨晓宇[1]，邱　宁[2]，李晓昂[1]，王　浩[3]，张　榆[4]，张乔根[1]
（1.电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049；2. 国家电网有限公司，北京 100031；
3. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192；4. 国网四川省电力公司电力科学研究院，成都 610041）

摘　要：通过传统静态耐压试验的超/特高压金属封闭组合电器(gas insulated switchgear，GIS)在开关操作过程中多次发生异物诱发放电故障，反映了传统静态耐压试验对潜伏性异物缺陷检测的局限性。为此提出了 GIS 外施激振耐压试验新方法和流程，在 GIS 耐压试验过程中外施机械振动，以期激发和增强潜伏性金属异物运动并实现高效检出，进一步，构建了 550 kV 真型 GIS 的外施激振耐压试验平台，并针对法兰狭缝潜藏、屏蔽罩潜藏及高密度异形等 3 类典型的潜伏性异物缺陷，研究试验新方法对缺陷的检测有效性。结果表明，潜伏性金属微粒缺陷在阶梯型静态试验电压下呈“静态蛰伏”状态，无超声、无局放、无击穿，难以有效检出；紧随其后，进行外施激振耐压试验，潜伏性金属微粒呈“脱陷”状态，且在不同电压阶梯下呈现间歇跳跃或持续舞动等运动状态，超声局放信号显著增强。据此，验证了 GIS 外施激振耐压试验对潜伏性金属微粒的检测有效性，为提升 GIS 设备绝缘可靠性提供了一种简单高效的绝缘试验新方法。

关键词：金属封闭组合电器；金属微粒；外施激振耐压试验；超声检测；冲击振动

Research on GIS External Excitation Voltage Withstand Test Method and Its Effectiveness in Detecting Latent Metal Particles

YANG Xiaoyu[1], QIU Ning[2], LI Xiaoang[1], WANG Hao[3], ZHANG Yu[4], ZHANG Qiaogen[1]
(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;
2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
4. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract：The occurrence of foreign object-induced discharge faults during switching operations of ultra/high-voltage gas-insulated switchgear (GIS) tested by conventional static withstand voltage tests can reflect the limitations of detecting latent foreign object defects by traditional static withstand voltage tests. This paper presents a novel method and procedure for conducting seismic endurance tests on GIS. Mechanical vibrations are externally applied during the GIS endurance test process, aiming to stimulate and enhance the movement of latent metal foreign objects to achieve efficient detection. Furthermore, a test platform for external excitation and vibration resistance was established for a 550 kV real-type GIS. This platform was used to investigate the effectiveness of a new testing method for detecting hidden defects such as flange gap concealment, shield cover concealment, and high-density irregularities. The results indicate that latent metal particle defects exhibit a “static dormant” state under stepped static test voltages, and neither ultrasound or partial discharge or breakdown occurs, making them difficult to detect effectively. Subsequently, during external vibration endurance tests, the latent metal particles show a “release” state, displaying intermittent jumping or continuous dancing movements under different voltage steps, and ultrasound and partial discharge signals significantly increase. This validates the effectiveness of the GIS external vibration withstand test in detecting latent metal particles, offering a simple and efficient insulation testing method to enhance the insulation reliability of GIS equipment.

Key words：GIS; metal particles; withstand voltage test under mechanical vibration; ultrasonic testing; impact vibration

基金资助项目：国家电网公司科技项目(5500-202326795A-3-8-KJ)。
Project supported by Science & Technology Project of SGCC(5500-202326795A-3-8-KJ).

0 引言

金属封闭组合电器(gas insulated switchgear，GIS)作为现代电力系统的重要组成部分，因其结构紧凑、绝缘性能优异以及运行可靠等优势而得到了广泛应用[1-3]。近年来，随着电网运行负荷的不断增加和设备老化问题的逐步显现，GIS 设备的绝缘状态检测和评估已成为电力工程领域研究的重点。国家电网公司自 2014 年开展的 550 kV 及以上电压等级 GIS 运行故障统计分析表明，微粒诱发放电导致的绝缘失效已发展成为GIS 设备可靠运行的关键性技术瓶颈[4-8]。更深入的统计结果显示：在 GIS 设备放电类故障中，微粒放电诱发故障占比高达 60%；而又有约 60%的击穿故障集中发生在开关操作后 10 ms 至 5 min 的关键时间窗内[9-12]。现有研究表明，GIS 在开关操作过程中产生的机械振动应力、操作过电压激励以及直流分量残余电场等多物理场耦合效应可能触发潜伏性绝缘缺陷并诱发放电现象[13-15]。现有静态耐压试验方法无法有效模拟上述动态工况，存在关键潜伏性缺陷漏检的风险，导致设备绝缘状态评估的准确性受到显著制约。因此，研究基于外施激振的 GIS 新型耐压试验方法，对高效激发潜伏性绝缘缺陷、实现缺陷的早期预警和精准定位具有重要价值[16-19]。本研究也为基于外施激振的 GIS 绝缘缺陷检测技术提供了试验数据支撑。

目前，学者针对金属封闭组合电器/气体绝缘金属封闭输电线路内部潜伏性缺陷展开了大量研究。华北电力大学王健研究团队构建了气体绝缘金属封闭输电线路(gas insulated line，GIL)三支柱绝缘子电荷测量与沿面闪络试验系统，系统性地研究了异物缺陷对电荷分布和沿面放电特性的影响机制，为 GIL 三支柱绝缘子的绝缘优化设计和故障预防提供了关键的理论基础[20]。西安交通大学李晓昂团队通过构建 252 kV 真型试验平台，模拟了 GIS 运行工况下自由金属微粒在冲击振动激励下的运动过程，阐释了多微粒起跳后诱发 GIS 气隙放电故障的机理，提出了工频-雷电冲击叠加电压下 GIS 绝缘缺陷检测的新方法[21]，发现在工频叠加负极性雷电冲击电压时，GIS 尖刺缺陷放电电压显著降低，可以有效检出绝缘缺陷[22]。北京交通大学的孙继星深入探讨了 GIL 中导电微粒的抑制与缺陷检测机制，并基于 GIL 标准耐压试验程序，系统性地研究了交流电场环境下微粒的受迫运动过程及其振动特性[23]。上海电力大学卢武系统性地综述了金属微粒对气-固界面电气特性的影响机制、沿面闪络过程的诱发发展机理以及表面电荷积聚规律及其抑制策略，为直流 GIS/GIL 绝缘子沿面闪络抑制及绝缘性能提升提供了探索方向[24]。

现有研究已通过系统性实验室验证，深入探讨了各类绝缘缺陷在常规电学检测方法下的响应特性，为该领域积累了丰富的识别经验。然而，此类方法本质上仍属于单一电学激励，对于在常规电压下处于“静态蛰伏”状态的潜伏性金属微粒——特别是藏匿于法兰狭缝、屏蔽罩内部等低场强区域的缺陷——仍存在激发能力有限、难以诱发稳定检测信号的问题，导致在实际检测中易产生漏判。与现有方法相比，本文所提出的外施激振耐压方法，其核心优势在于首次在耐压试验中模拟了 GIS 开关操作中“机械振动+强电场”的联合作用，复现了实际运行中诱发潜伏性缺陷的真实工况。该方法通过引入与现场振动强度相符的外施激振，促使潜藏微粒脱离低场强区域、进入主绝缘区域并产生持续运动，从而在超声检测中形成稳定、可辨的信号响应。为此，本研究构建了 550 kV 真型 GIS 试验平台，重点针对高密度异形微粒、法兰狭缝潜藏微粒及屏蔽罩内潜藏微粒 3 类典型潜伏性缺陷，开展外施激振耐压试验，系统评估该方法在激发潜伏性微粒运动与提升检测能力方面的有效性与适用性，以弥补现有检测体系在机械敏感类潜伏缺陷识别方面的不足。

1 外施激振耐压的 550 kV 真型试验平台与方法

1.1 试验平台

本研究以平芝厂内 550 kV GIS 平台为试验基础，该平台由母线、过渡筒体、断路器、隔离开关及一截母线试品等关键组件构成，如图 1 所示。试验采用 SF_6气体作为绝缘介质，其中断路器气室额定气压为 0.55 MPa，其余气室额定气压为 0.50 MPa(均为 20 ℃标况值)；试验过程中各气室气压均维持在额定值。实验室环境温度控制为 18~25 ℃，相对湿度范围为 40%~60%。

试品母线结构由盆式、单支柱绝缘子和专用吸附法兰组成，如图 2 所示。测试区域集中于 2 个中间盆式绝缘子之间，采用特高频检测、超声检测和高速摄像技术等多种检测方法进行综合性能评估。

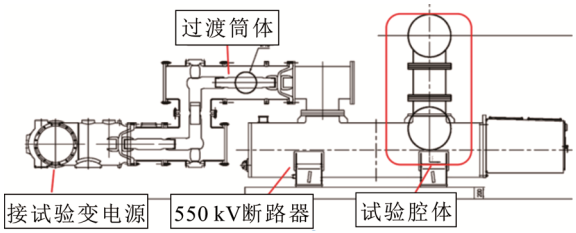


图 1　550 kV GIS 试验平台结构图

Fig. 1　Experimental platform diagram of the 550 kV GIS

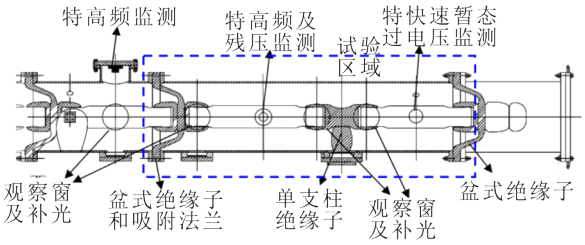


图 2　试验腔体结构示意图

Fig.2　Schematic diagram of test busbar

1.2　外施激振与检测装置

运行经验与实测数据表明，550 kV GIS 断路器在分合闸操作过程中产生的机械振动加速度峰值可达 100g(g 为重力加速度，取 9.8 m/s^2)，持续时间为 30~50 ms[22]。图 3(a)和图 3(b)分别展示了实际断路器操作中测得的振动加速度波形以及外施激振装置输出的典型波形。本研究采用的基于电磁继电器驱动的外施激振装置，其结构原理与安装方式如图 4 所示，激振参数设定为强度 60g~100g、脉宽 20~30 ms、频次为每 20 s 1 次。该参数组合充分考虑了实际开关操作中振动加速度的主要分布特征，可准确模拟机械冲击过程；激振频次的设定兼顾试验效率与设备安全，既为潜伏性微粒的激发提供充分机会，又避免因连续激励可能引发的累积应力风险。因此，本文所采用的外施激振参数在工况一致性与试验可行性方面均具备合理依据，能够有效模拟实际分合闸操作的动态力学环境。

在 550 kV 平芝断路器上，通过 ICP601A02 振动加速度传感器(频率响应范围：0.17 Hz~10 kHz，灵敏度为 50.1 mV/g)进行外置式安装，测量开关操作和外施激振下的振动加速度信号。借助 AY-HL 4C 型恒流适配器对传感器信号进行调理，将检测信号转换为标准信号，并利用示波器存储和显示加速度信号采样数据。

采用外置式 Soundwel G40 超声传感器，频率响应范围为 15~70 kHz，谐振频率为 40 kHz，灵敏度峰值> −75 dB。放电信号通过该传感器采集，并经 PAI 型宽带前置放大器进行放大和滤波处理，放大器工作频带为 0.01~2 MHz，有效覆盖传感器测量频带，增益为 40 dB，输入阻抗>50 MΩ，输出阻抗为 50 Ω。前置放大器输出端连接 PPS2K 供电信号分离

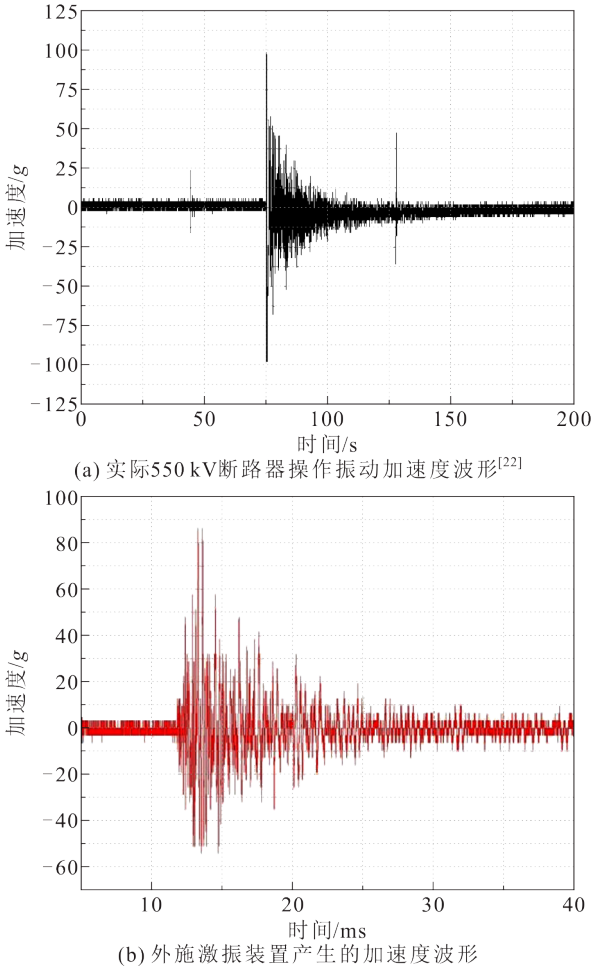


图 3　实测断路器操作振动与外施激振装置输出波形对比

Fig.3　Comparison of measured operating vibration of circuit breaker and output waveform of external excitation device

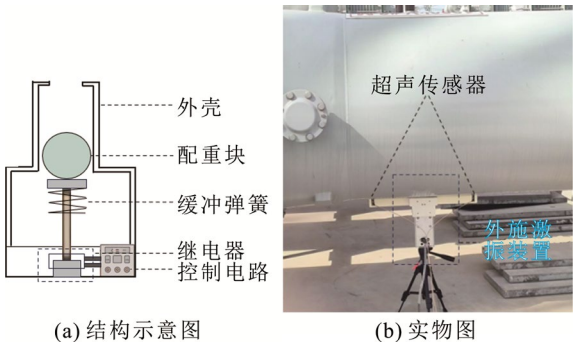


图 4　外施激振装置

Fig.4　External vibration application device

器，输入和输出阻抗分别为 50 Ω 和 2 kΩ，最终通过示波器存储与显示声信号采样数据。

为明确检测信号的基准，在无激振、无放电条件下对检测系统的背景噪声进行了测量。超声检测通道的背景噪声水平典型值为 2~3 mV(前置放大器输出电压)。为有效提取微粒运动特征并抑制干扰，对原始超声信号进行了 10~50 kHz 的带通滤波处理。特高频检测通道的背景噪声水平为−70 dB，其有效工作频带为 0.3~1.5 GHz。

1.3 缺陷设置

本研究选取法兰狭缝潜藏、屏蔽罩潜藏及高密度异形这 3 类潜伏性金属微粒作为研究对象，该选择基于国家电网公司 2014—2024 年间超特高压 GIS 故障统计与断路器机械操作试验的实证数据。统计表明，金属微粒诱发的绝缘放电故障占比超过 60%，且在材质(铝、铜、银)与尺寸(以亚毫米级为主，含微米级粉尘及异形大微粒)上具有典型分布。尽管微粒多集中于壳体与盆式绝缘子附近，仍有少数潜藏于法兰狭缝或屏蔽罩内部，常规静态耐压试验如表 1 所示，难以有效检出，却可在机械振动下被激发并引发放电，与实际故障案例相符。因此，本研究聚焦上述 3 类典型潜伏性缺陷，以弥补现有检测手段的盲区。3 类典型潜伏性金属微粒的位置示意图及实物图像如图 5 所示。

1.4 试验规范与判据

在开展外施激振耐压试验前，需首先完成常规耐压试验。常规耐压试验作为基础性检测手段，虽可有效识别大部分微粒缺陷，但对于潜伏性金属微粒仍存在检测盲区，外施激振耐压试验即针对此类潜伏性缺陷。若设备未通过常规耐压试验，则无须进行外施激振耐压试验。试验过程中通过阵列式超声传感器对微粒运动进行监测，并结合试品击穿与否进行结果的判定。

外施激振耐压试验按 4 阶段电压档位逐级实施。

1）318 kV 档位(1 倍运行电压)：加压至 318 kV 后，执行持续 5 min 的外施激振耐压试验，激振参数设置为每 20 s 施加 1 次、幅值 60*g*~100*g*(可调)。

2）381 kV 档位(1.2 倍运行电压)：升压至 381 kV，同样持续 5 min，激振条件与 318 kV 档位完全一致(每 20 s 激振 1 次，幅值 60*g*~100*g* 可调)。

3）592 kV 档位(0.8 倍工频耐压)：继续升压至 592 kV，维持 5 min 耐压时间，激振频率与幅值控制同前。

4）740 kV 档位(1 倍工频耐压)：最终加压至 740 kV，进行 1 min 外施激振耐压试验，激振参数仍保持每 20 s 1 次、幅值 60*g*~100*g* 可调。

全过程中同步采集超声及特高频信号，具体试验流程如图 6 所示，试验参数如表 2 所示。

试验结束后，若受测样品未发生贯穿性放电且未检出局部放电信号，则判定耐压试验合格；若出现贯穿性放电，则判定为不合格；若未发生贯穿性放电但检测到局部放电信号，须对其特征进行深入分析，评估其对绝缘系统的潜在风险，并据此确定后续处理方案。局部放电的判据如下：超声信号幅值持续高于背景噪声 3 倍以上(信噪比≥3)，且表现

表 1 不同种类微粒在耐压试验中的表现

Table 1 Performance of different types of particles in pressure resistance tests

序号	缺陷类型	常规耐压试验现象	是否容易检出
1	常规线形铝微粒	升压或耐压过程中跳动或引起放电	√
2	法兰狭缝潜藏微粒	无超声、无局放、无击穿	×
3	屏蔽罩潜藏微粒		×
4	高密度异形微粒		×

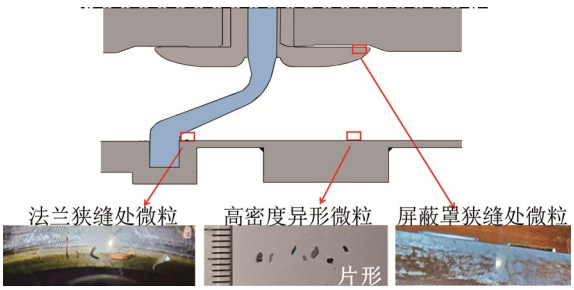


图 5 3 类微粒放置位置示意图及实物图

Fig.5 Schematic diagram and physical image of the placement of three types of particles

表 2 外施激振耐压试验设置

Table 2 Setting up external excitation and voltage withstand test

电压等级/kV	耐压时间/min	激振频次/(s·次$^{-1}$)	激振波形特征
318	5	20	幅值达 60*g*~100*g*，持续时间为 20~30 ms
381	5		
592	5		
740	1		

为持续时间≥1 s 的非周期性脉冲序列，视为存在局部放电；特高频信号则以幅值超过背景噪声 10 dB 且脉冲重复频率不低于 5 次/s 作为判断依据。试验结果的具体制定见表 3。

2　外施激振试验结果及分析

2.1　法兰狭缝处潜藏微粒

需要说明的是，尽管试验中同步采用了特高频检测，但在所有涉及潜伏性金属微粒激发的典型工况下，特高频通道均未观测到显著的脉冲计数变化或频谱特征。分析认为，本研究所针对的潜伏性微粒在外施激振后主要表现为机械位移与持续运动，其引发的超声信号响应远早于且强于可能产生的局部放电特高频信号。因此，下文将重点分析与展示具有明确表征意义的超声检测结果及高速摄像观测现象。

考虑到微粒在 GIS 中的随机分布特征，易聚集于法兰缝隙等电场强度较低的区域，导致传统耐压检测方法难以有效识别。试验中，将铝制及铜制线形微粒精确置于壳体与盆式绝缘子间缝隙处，并依据表 4 方案选用单组或多组混合微粒进行测试。例如，某次试验前在三交区上方法兰缝隙处精确放置了 6 枚铜制线形微粒。为有效区分振动干扰与真实的微粒运动信号，本研究对原始超声信号进行了 10~50 kHz 的带通滤波预处理，并剔除了激励后 1 s 内由激励源引起的衰减振荡成分。真实微粒运动信号表现为持续数秒的非周期性脉冲序列，其幅值通常高于背景噪声 3 倍以上，信噪比>3。

针对法兰狭缝处潜藏微粒缺陷，本研究选取一次具有代表性的典型试验为例进行说明。首先开展多阶梯的静态耐压试验。在 318、381、592、740 kV 下均无微粒运动、无超声局放、无击穿，缺陷呈潜伏状，未被有效检出。随后开展外施激振耐压试验，在 381 kV 条件下首次检测到金属微粒在外施激励后持续运动所产生的超声信号，如图 7 所示，下同。发现超声信号呈 3 个阶段：外施激振前微粒静止，无信号；外施激振后 1 s 内，超声信号呈高幅值衰减振荡特征(振动干扰所致)，无法有效分离微粒运动超声信号；随后，振动干扰消失，微粒运动超声信号显现并持续数秒。超声信号消失的主要原因可能是微粒逃逸后进入拔口或陷阱等低场强区域所致。

在后续的不同档位外施激振耐压试验过程中，会有一定概率出现前述相似的现象，这主要是由于

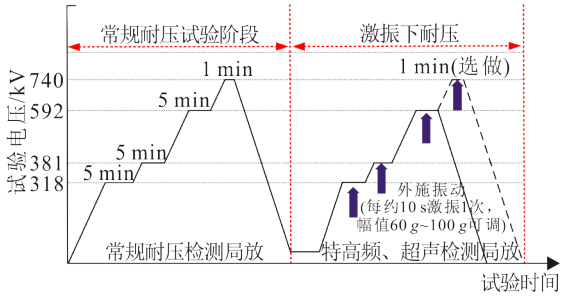


图 6　外施激振试验加压流程

Fig.6　Procedure for applying voltage in external excitation vibration test

表 3　GIS 外施激振耐压试验的结果判定

Table 3　Determination of the results of GIS external excitation voltage test

是否击穿	有无局放	结果判定
有	—	×
无	无	√
无	有	需进一步分析

表 4　法兰狭缝处潜藏微粒布置方案

Table 4　Arrangement of particles concealed in fracture apertures

序号	材质	形状	尺寸	数量
1	铜	线形	4 mm×0.1 mm	1
2			5 mm×0.1 mm	2
3			5 mm×0.2 mm	1
4			5 mm×0.3 mm	2
5	铝	线形	5 mm×0.3 mm	2
6			5 mm×0.4 mm	1

外施激振下微粒运动的随机性很强，并非每次外施激振均能导致法兰狭缝处潜藏微粒的逃逸。因此，采用重复激振的方法增大潜伏性微粒的激发概率，从而提升其检出效果。

在外施激振耐压结束后，设备解体检查发现：所设置的 6 个潜伏性金属微粒均被有效激发逃逸，并迁移至 GIS 不同位置(4 个微粒迁移至拔口陷阱中、1 个微粒吸附于盆式绝缘子表面、1 个微粒重新回到法兰狭缝中)。

2.2　屏蔽罩潜藏微粒

鉴于微粒在 GIS 中的随机分布特性及受断路器操作气流等偶发因素影响，微粒易隐匿于场强较低的屏蔽罩内部，导致常规耐压试验难以检出。本研究选择在高压导杆-触座连接缝隙处布置微粒(包括铝制线形、铜制线形、铝制片形及铜制片形)，并依

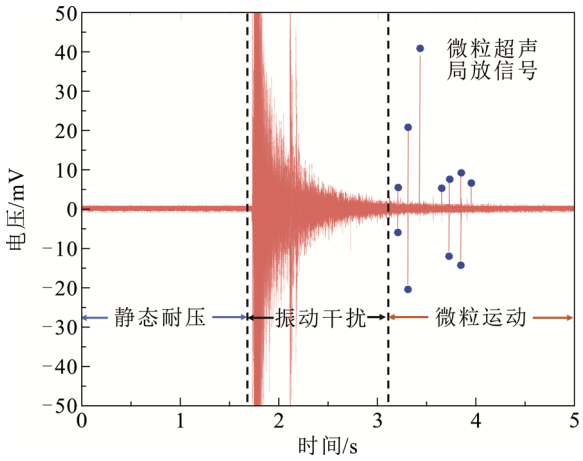


图 7 381 kV 激振后超声波形

Fig.7 Ultrasonic waveform after 381 kV excitation

据表 5 方案灵活选取单组或多组混合微粒进行试验。例如：在触座与导体缝隙间布置预定尺寸的 6 枚铜制微粒及 4 枚铝制微粒。

针对屏蔽罩处潜藏微粒缺陷，本研究选取 1 次具有代表性的典型试验为例进行说明。首先开展多阶梯的静态耐压试验。在 318、381、592、740 kV 下均无微粒运动、无超声局放、无击穿，缺陷呈潜伏状，未被有效检出。随后开展外施激振耐压试验，在 381 kV 耐压结束后的第 2 次激振过程中，通过高速相机捕捉到微粒跳动现象(初步识别为线形与片形微粒各异)，并同步检测到微粒运动超声信号如图 8 所示，超声信号仍呈 3 个阶段。

继续升压至 592 kV，耐压过程中观察到一线形微粒持续跳动。因相机视角受限，无法判断该微粒源自屏蔽罩掉落或是已掉落微粒重新进入视野。该微粒在短暂运动后最终消失。

当电压上升至 740 kV 时发生放电。外施激振耐压试验结束后解体检查发现：所设置的 10 个微粒均被有效激发逃逸，并迁移至 GIS 不同位置(4 个片状微粒与 1 根铜丝迁移至拔口陷阱中、4 个线形微粒吸附于盆式绝缘子表面、吸附法兰右侧发现放电点和 1 根丝状微粒，导体表面亦观察到放电点)。

2.3 高密度异形微粒

鉴于机械摩擦导致的高密度异形微粒在 GIS 内普遍存在且具有较高起跳场强，常规耐压试验往往难以检测。本研究将此类微粒(主要为铜制圆片和方片)置于支柱绝缘子旁试品内壁，并依据表 6 方案按需放置单组或多组混合微粒。

针对高密度异形微粒缺陷，本研究选取 1 次具有代表性的典型试验为例进行说明。首先开展多阶梯的静态耐压试验。在 318、381、592、740 kV 下均无微粒运动、无超声局放、无击穿，缺陷呈潜伏状，未被有效检出。随后进行外施激振耐压试验，首次激振即导致微粒启举，但未检测到显著超声及特高频信号。后续激振过程中，微粒仍仅呈现短暂启举而未发生持续运动。

表 5 屏蔽罩处潜藏微粒布置方案

Table 5 Arrangement scheme of hidden particles at the shielding cover location

序号	材质	形状	尺寸	数量
1	铜	线形	4 mm×0.1 mm	3
2			4 mm×0.2 mm	1
3			4 mm×0.3 mm	1
4	铜	片形	4 mm×4 mm×0.2 mm	1
5			5 mm×5 mm×0.2 mm	1
6	铝	线形	4 mm×0.3 mm	1
7			4 mm×0.4 mm	1
8	铝	片形	4 mm×4 mm×0.1 mm	1
9			5 mm×5 mm×0.1 mm	1

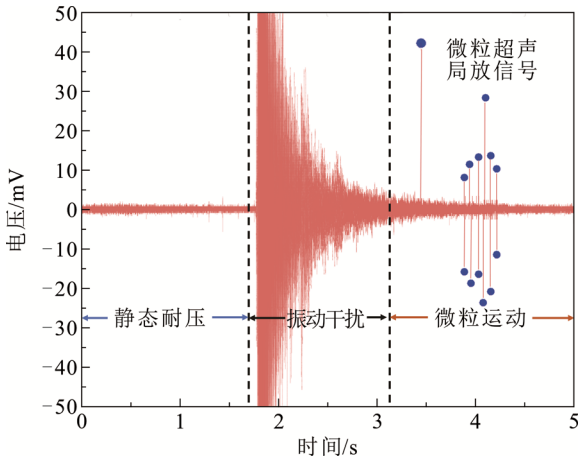


图 8 381 kV 激振后超声波形

Fig.8 Ultrasonic waveform after 381 kV excitation

表 6 高密度异形微粒布置方案

Table 6 Arrangement strategy for high-density irregular micro particles

序号	材质	形状	尺寸	数量
1	铜	圆片形	直径 2 mm	2
2			直径 3 mm	3
3			直径 5 mm	2
4	铜	方片形	4 mm×4 mm×0.2 mm	3
5			5 mm×5 mm×0.2 mm	3

直至电压升至 740 kV 时，激振后首次观测到微粒持续运动现象，并同步捕获相关超声信号如图 9 所示。通过分析可知，微粒超声局放信号幅值达 15 mV，持续约 2 s 后信号消失，推测为微粒停止运动。

重复对不同位置的各种尺寸、类型金属微粒进行上述试验，得到试验结果汇总如表 7 所示。

3　结论

本研究针对法兰狭缝潜藏、屏蔽罩潜藏以及高密度异形这 3 类典型潜伏性异物缺陷，开展外施激振耐压试验，得到结论如下所述。

1）明确了外施激振耐压试验的方法与流程，建议在 GIS 通过常规耐压试验后开展该试验，采用阶梯升压方式进行，外施激振强度参考 GIS 实际分合闸操作中所产生的机械振动强度，确保激励条件与实际工况相符。

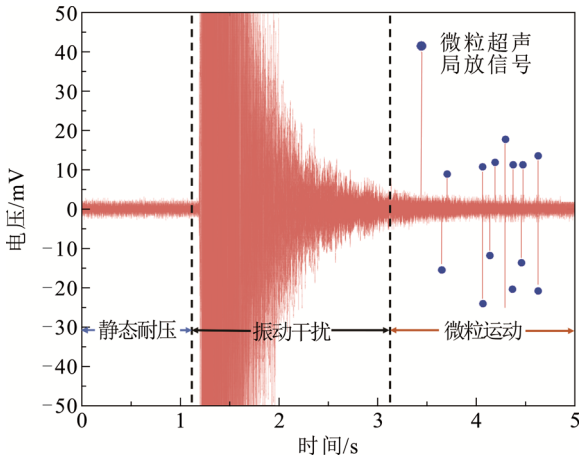


图 9　740 kV 激振后超声波形

Fig.9　Ultrasonic waveform after 740 kV excitation

表 7　试验结果总览

Table 7　Overview of experimental results

组号	微粒类型	常规耐压试验现象	外施激振耐压试验现象
1	法兰狭缝微粒 (5 mm×0.2 mm 铝丝 3 个)	加压至 581 kV 时发生放电	
2	法兰狭缝微粒 (5 mm×0.1 mm、5 mm×0.3 mm 铜微粒各 2 个；5 mm×0.3 mm、5 mm×0.4 mm 铝微粒各 2 个)	无超声，无局放，无击穿	318 kV 第 1 次激振后多微粒跳出，持续运动数秒到数十秒不等后消失
3	屏蔽罩潜藏微粒 5 mm×0.1 mm 铜丝 2 个；5 mm×0.3 mm 铝丝 2 个)	无超声，无局放，无击穿	592 kV 第 3 次激振后有微粒掉落，持续不到 1 s 后消失
4	高密度异形微粒 (直径 2 mm×厚度 0.2 mm、直径 5 mm×厚度 0.2 mm 铜制圆片各 2 个)	无超声，无局放，无击穿	318 kV 第 2 次激振后有微粒持续运动

2）典型潜伏性金属微粒在常规静态耐压试验中表现为“静态蛰伏”状态，无微粒运动、无超声局放、无击穿等现象，难以被常规检测手段有效识别。

3）在外施振动激励后，潜伏性微粒可被有效激发，呈现间歇跳跃或持续运动等活跃状态，并伴随超声局放信号的显著增强，验证了外施激振耐压试验对潜伏性微粒缺陷的检测有效性。

4）相较于工频-雷电冲击叠加电压等现有方法，外施激振法在激发如法兰狭缝、屏蔽罩潜藏等隐蔽位置处的潜伏性微粒方面具有独特优势，适用于对常规耐压试验无法检出的机械敏感类缺陷进行有效复检，可作为现有电学检测手段的重要补充，共同提升 GIS 设备绝缘状态评估的完整性与可靠性。

参考文献　References

[1] 张连根，路士杰，李成榕，等. 气体绝缘组合电器中微米量级金属粉尘运动和放电特征[J]. 电工技术学报，2020，35(2)：44-452.
ZHANG Liangen, LU Shijie, LI Chengrong, et al. Movement and discharge characteristics of micron-scale metal dust in gas insulated switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 44-452.

[2] 高克利，颜湘莲，刘　焱，等. 环保气体绝缘管道技术研究进展[J]. 电工技术学报，2020，35(1)：3-20.
GAO Keli, YAN Xianglian, LIU Yan, et al. Progress of technology for environment-friendly gas insulated transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(1): 3-20.

[3] 王康宁，王天正，闫　杰，等. GIS 中典型绝缘缺陷模拟及局部放电信号特征分析[J]. 电子测试，2013(22)：215-217.
WANG Kangning, WANG Tianzheng, YAN Jie, et al. Typical insulation defects simulation and signal characteristics analysis of GIS partial discharge[J]. Electronic Test, 2013(22): 215-217.

[4] 李庆民，王　健，李伯涛，等. GIS/GIL 中金属微粒污染问题研究进展[J]. 高电压技术，2016，42(3)：849-860.
LI Qingmin, WANG Jian, LI Botao, et al. Review on metal particle contamination in GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 849-860.

[5] 庞先海，王　潇，乔松松，等. SF_6/N_2 混合气体中金属微粒在工频电压下运动的仿真与实验研究[J]. 高电压技术，2021，47(2)：679-686.
PANG Xianhai, WANG Xiao, QIAO Songsong, et al. Simulation and experimental study on the motion of metal particles in SF_6/N_2 mixed gas under power frequency voltage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 679-686.

[6] 树　婷，杨玥坪，郭若琛，等. 交流与负极性雷电冲击叠加电压下 SF_6 中自由金属颗粒局部放电激发特性[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3305-3315.
SHU Ting, YANG Yueping, GUO Ruochen, et al. Partial discharge excitation characteristics of free metal particles in SF_6 gas under AC and negative lightning impulse superposition voltage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3305-3315.

[7] 刘云鹏，黄志成，耿江海，等. 颗粒与绝缘子碰撞黏附问题的模型选择[J]. 高电压技术，2022，48(3)：809-819.
LIU Yunpeng, HUANG Zhicheng, GENG Jianghai, et al. Selection of model for particle-insulator collision adhesion problem[J]. High Volt-

age Engineering, 2022, 48(3): 809-819.
[8] 张连根，路士杰，李成榕，等. GIS 中线形和球形金属微粒的运动行为和危害性[J]. 电工技术学报，2019，34(20)：4217-4225.
ZHANG Liangen, LU Shijie, LI Chengrong, et al. Motor behavior and hazard of spherical and linear particle in gas insulated switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4217-4225.
[9] 张乔根，李晓昂，刘 琳，等. GIS 中 SF_6 绝缘系统缺陷放电的“0-1”现象[J]. 高电压技术，2019，45(9)：2689-2698.
ZHANG Qiaogen, LI Xiaoang, LIU Lin, et al. "One-Zero" phenomenon of discharge induced by defects in SF_6 insulation systems in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2689-2698.
[10] 李庆民，常亚楠，王 健，等. 气体绝缘输电管道微粒陷阱设计技术研究进展[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4182-4193.
LI Qingmin, CHANG Ya'nan, WANG Jian, et al. Methodological advances of metal particle traps design in gas insulated transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4182-4193.
[11] 季洪鑫. 交流运行电压下 GIS 中金属颗粒运动行为及放电特征[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2017.
JI Hongxin. Study on movement behavior and discharge characteristic of metal particle in GIS under AC operating voltage[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2017.
[12] 李晓昂，李 杰，任 静，等. 冲击振动激励下 GIS 内自由金属微粒起跳特性[J]. 高电压技术，2022，48(5)：2005-2012.
LI Xiaoang, LI Jie, REN Jing, et al. Lift-off characteristics of free metal particles in GIS under shock vibration[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 2005-2012.
[13] MA J T, ZHANG Q G, WU Z C, et al. Breakdown characteristics of particle-contaminated HVDC GIL under superimposed voltage of DC and impulse[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1439-1447.
[14] LI X A, WU M H, HU X W, et al. Discharge characteristics of insulation defects in GIS under AC/LI superimposed voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(5): 2017-2025.
[15] 吴细秀，冷宇宽，庞文龙，等. GIS 母线潜伏性故障电场劣化特性与故障概率预测研究[J]. 电网技术，2023，47(7)：3018-3028.
WU Xixiu, LENG Yukuan, PANG Wenlong, et al. Electric field degradation characteristics and fault probability prediction of GIS busbar latent faults[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 3018-3028.
[16] 李 星，刘卫东，许 渊，等. 冲击振动下 GIS 内金属颗粒运动及其诱发沿面闪络特性[J]. 中国电机工程学报，2023，43(7)：2838-2847.
LI Xing, LIU Weidong, XU Yuan, et al. Movement behavior of metal particles and its induced insulator flashover characteristics under impact vibration in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2838-2847.
[17] LI X A, WANG S X, LÜ X X, et al. Investigations on the path of defect-induced discharge in GIS under AC/LI superimposed voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2025, 32(1): 400-407.
[18] 李军浩，车 斌，韩旭涛，等. 特高压气体绝缘组合开关设备现场冲击耐压试验及局部放电测量[J]. 高电压技术，2015，41(11)：3659-3665.
LI Junhao, CHE Bin, HAN Xutao, et al. Field impulse withstand test and partial discharge detection for ultra high voltage gas insulated switchgear equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3659-3665.
[19] 李 杰，李晓昂，吕玉芳，等. 工频电压下片状自由金属微粒带电特性与运动规律研究[J]. 中国电机工程学报，2021，41(3)：1166-1175.
LI Jie, LI Xiaoang, LÜ Yufang, et al. Study on the charge characteristics and movement pattern of lamellar particles under power frequency voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 1166-1175.
[20] 李 玄，尹奕淳，王 媛，等. 直流 GIL 内金属微粒/粉尘面向三支柱绝缘子的吸附行为与闪络特性[J]. 高电压技术，2025，51(5)：2516-2528.
LI Xuan, YIN Yichun, WANG Yuan, et al. Adsorption behavior and flashover characteristics of DC GIL metal particles/dust facing tri-post insulator[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2516-2528.
[21] 胡新文，李晓昂，王舒啸，等. 冲击振动激励下 GIS 内自由金属微粒运动及其诱发间隙击穿特性[J]. 高电压技术，2024，50(1)：339-347.
HU Xinwen, LI Xiaoang, WANG Shuxiao, et al. Free metal particles movement and its induced gap breakdown characteristics in GIS under impact vibration[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 339-347.
[22] 李晓昂，杨晓宇，吕肖肖，等. GIS 带电操作下金属微粒起跳吸附及诱发绝缘子沿面闪络特性[J]. 高电压技术，2025，51(3)：1025-1037.
LI Xiaoang, YANG Xiaoyu, LÜ Xiaoxiao, et al. Metal particles movement and its induced insulator flashover characteristics in GIS under electrified operation[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1025-1037.
[23] 孙继星，戴 琪，边 凯，等. 自由导电微粒受迫运动过程与振动特性[J]. 电工技术学报，2018，33(22)：5224-5232.
SUN Jixing, DAI Qi, BIAN Kai, et al. Forced movement process and vibration characteristics of free conductive particle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5224-5232.
[24] 卢 武，杨 华，张 俊，等. 直流 GIS/GIL 中金属微粒诱发沿面闪络的机理研究与抑制策略综述[J]. 高电压技术，2025，51(3)：1010-1024.
LU Wu, YANG Hua, ZHANG Jun, et al. Review on mechanism study and suppression strategy of metal particles induced surface flashover in DC GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1010-1024.



杨晓宇
2002—，男，硕士生
主要研究方向为GIS/GIL 绝缘状态监测与诊断技术
E-mail: 1780914882@qq.com
YANG Xiaoyu



邱 宁
1973—，男，高工
从事特高压变电工程建设和特高压技术攻关工作，负责特高压 GIS 设备专业管理
E-mail: ning-qiu@sgcc.com.cn
QIU Ning
Senior engineer



李晓昂(通信作者)
1989—，男，博士，研究员，博导
主要从事脉冲功率技术、高电压试验技术、脉冲放电等离子体方面的研究工作
E-mail: li_xiaoang@xjtu.edu.com
LI Xiaoang
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2025-10-09 在线出版日期 2026-02-02 编辑 曾文君