第 49 卷 第 10 期：4046-4057 高电压技术 Vol.49, No.10: 4046-4057
2023 年 10 月 31 日 High Voltage Engineering October 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221190

苏通综合管廊工程特高压 GIL 绝缘关键技术

彭宗仁[1]，张鹏飞[2,3]，刘　鹏[1]，韩先才[3]，杨保利[4]，崔博源[2]，吴泽华[1]，田汇冬[5]，王浩然[2]

（1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室，西安 710049；2. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192；3. 国家电网有限公司，北京 100031；4. 平高集团有限公司，平顶山 467001；5. 国网经济技术研究院有限公司，北京 102209）

摘　要：气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)已广泛应用在极端环境和紧凑条件下的电力输送，GIL 绝缘可靠性关系到系统运行安全稳定，是其规模化应用的基础和关键。特高压苏–通穿江输电采用 GIL 管廊输电方式，其距离长、电压高，绝缘结构典型，材料特性复杂，运行工况特殊，研发之初无可以借鉴的经验。针对特高压苏–通 GIL 综合管廊工程，研究掌握了 GIL 绝缘子用环氧复合材料电、热、力性能及其随温度的变化规律，结合固化动力学–热–力耦合仿真分析了材料工艺流程，开发了释缓界面应力、屏蔽界面缺陷的半导电界面材料，提出了材料关键性能控制指标；基于多物理场耦合仿真与复杂曲面优化设计方法，优化设计了特高压 GIL 盆式绝缘子结构，发明了哑铃型三支柱绝缘子，提出了苏–通 GIL 综合管廊基础单元绝缘子和载流结构配置方案；总结详述了 GIL 真型绝缘子的放电特性。通过研究解决了特高压交流 GIL 输电中的关键绝缘问题，掌握了特高压交流 GIL 的核心技术，为先进 GIL 输电装备自主研发提供了重要依据，为保障华东特高压交流环网可靠运行提供了有力技术支撑。

关键词：特高压；气体绝缘金属封闭输电线路；材料特性；结构设计；放电特性

Key Insulation Technology of UHV GIL in Sutong Utility Tunnel Project

PENG Zongren[1], ZHANG Pengfei[2,3], LIU Peng[1], HAN Xiancai[3], YANG Baoli[4], CUI Boyuan[2], WU Zehua[1], TIAN Huidong[5], WANG Haoran[2]

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 4. Pinggao Group Co., Ltd., Pingdingshan 467001, China; 5. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: Gas insulated metal enclosed transmission line (GIL) has been widely used in power transmission under extreme environment and compact conditions. The reliability of the GIL insulation is related to the safety and stability of power system, which is the basis and the key of large-scale application. UHVAC GIL was applied for the Soochow-Nantong(for short: Sutong) river-spanning transmission, possessing the characteristics of long distance, high voltage, typical insulation structure, complex material and special operating conditions. There is no experience to learn from at the beginning of the research and development. Aiming at the UHV Su-Tong GIL project, we analyzed the electrical, thermal and mechanical properties of the epoxy composite used for GIL insulator , as well as their change law with temperature. The technological process was studied in combination with the curing dynamics-thermal-mechanical coupling simulation. A semi-conductive interface material for relieving interface stress and shielding interface defects is developed, and the key performance control index of the material is proposed. Based on the multi-physical-field coupling simulation and the complex surface optimization design method, the basin insulator and tri-post insulator used in UHV GIL are optimized and designed. Besides, the configuration scheme of insulator and current carrying structure of foundation unit of GIL are also developed. And the discharge characteristics of GIL insulators are summarized in detail. Through the researches, the key insulation problems have been solved and the core technology of UHVAC GIL has been mastered, which provides an important basis for the independent manufacture and application of advanced GIL transmission equipment. A strong tech-

基金资助项目：国家电网公司总部科技项目(5500-202199528A-0-5-ZN)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5500-202199528A-0-5-ZN).

nical support also has been provided for the reliable operation of UHVAC loop network in East China.

Key words：ultra high voltage; gas-insulated metal-enclosed transmission line; material characteristics; structure design; discharge characteristics

0　引言

气体绝缘金属封闭输电线路(gas-insulated metal-enclosed transmission line, GIL）是一种采用高压气体绝缘，外壳与导体同轴布置的高电压、大电流电力传输装备。与架空线路相比，GIL 输送容量大，损耗低，可靠性高，对天气不敏感，无绝缘老化问题，同时具有占地面积小、安全环保、抗震能力强和适应于高落差输电的特点[1]，作为架空线路、电力电缆的互补输电方案，在大容量、长距离输电领域已经得到日益广泛的应用。20 世纪 70 年代起，美国、德国、日本等相继开展了不同电压等级 GIL 研究并投入实际应用，但总体上敷设距离较短，电压等级多为 550 kV 以下，特高压领域尚无运行经验。我国自 2015 年起启动了特高压 GIL 设备研制，在淮南–南京–上海特高压输电工程替代特高压 GIS 母线进行了变电站试用并取得成功[2-3]。以此为基础，研究确定了南通–苏州长江大跨越采用江底隧道安装 GIL 的方式，这也是世界首次正式开展的长距离特高压 GIL 大规模工程应用。

苏通 GIL 综合管廊工程单相长度约 5.7 km，双回六相总计约 34.2 km 长，是世界上首个电压等级最高、输送容量最大、输电距离最长的 GIL 创新工程[4-7]。受隧道掘进、施工及地质条件等因素限制，苏通综合管廊工程要求 GIL 三维弯延敷设，有垂直、倾斜和水平 3 种方式，致使其内部存在温度梯度和应力变化等多种复杂因素，电气、机械、温升等性能指标要求高，均场、均压、均热难度大。工程中铺设的特高压 GIL 输电线路作为华东地区特高压交流双环网跨越长江的咽喉要道，长期承载着华东电网系统的全电压和全电流，一旦发生事故，将严重威胁华东电网系统的安全稳定运行。设计要求苏通 GIL 内近千只用于机械支撑、电气绝缘和气室隔离的绝缘子均实现零放电。因此，研发过程中在材料性能、界面效应、多物理场分布、绝缘结构优化，以及绝缘子本体、SF_6 气体间隙、气–固界面的放电特性等方面，极具挑战性和创新性。开展特高压 GIL 绝缘关键技术研究，对提升特高压 GIL 产品设计可靠性，确保苏通综合管廊工程在设计年限内安全稳定运行，意义重大。

本文针对苏通综合管廊工程应用，围绕长距离 GIL 绝缘关键技术问题，开展了材料特性、结构设计和放电特性研究，分析了绝缘材料、界面材料及导电材料的电、热、力特性，研究了 GIL 典型结构工程应用方案的电、热、力多物理场分布特性，优化了 GIL 绝缘结构、均压屏蔽结构和关键工艺技术，探索了 GIL 固体绝缘本体及气–固界面放电特性，为世界首条特高压 GIL 输电装备设计、制造和运行提供参考和依据。

1　特高压 GIL 材料特性研究

图 1 给出了苏通 GIL 支撑绝缘子整体结构示意图。特高压苏–通穿江 GIL 管廊输电，绝缘子是关键，绝缘材料是基础。环氧复合材料特性直接影响了绝缘子的电、热、力性能。根据 GIL 运行工况，掌握并调控 GIL 用环氧复合材料电、热、力特性，是提升绝缘子质量与运行可靠性的重要措施。一方面，材料特性能够为特高压 GIL 多物理场仿真分析提供输入参数，提升仿真计算的精确性；另一方面，结合结构设计也能够为制定性能控制指标提供支撑。此外，与材料相关的固化特性研究，还可以为绝缘子制造工艺优化提供依据。

GIL 金属–环氧粘接界面材料亦是研究重点，异性材料的粘接界面是膨胀收缩应力集中面，也是产生微裂的引发点。开发性能优良的界面材料对界面进行合理处理，能够有效释缓绝缘子界面应力、抑制界面效应。

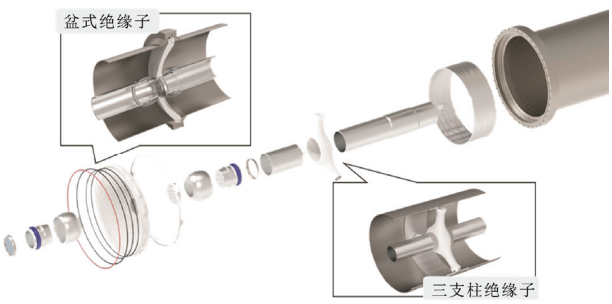


图 1　苏通 GIL 整体结构示意图

Fig.1　Overall structure diagram of supporting insulator used in Sutong GIL

1.1 环氧复合材料

1.1.1 环氧复合材料特性与性能要求

GIL 绝缘子除了起到电气绝缘的作用，还应负荷载流导体重量，大容量输电带来的热效应是不可忽视的。根据国内外材料学和电工领域的研究经验，GIL 绝缘子用环氧复合材料特性的关键特性参数应包括电气性能、机械性能、理化性能及其随温度的变化特性，其中涵盖复合材料拉伸强度、弯曲强度、压缩强度、介电常数、介质损耗、玻璃化温度、线膨胀系数、击穿场强、耐电弧性能、氧化铝填料和复合状态等[8-12]。除常规性能外，玻璃化转变温度和热膨胀系数是需要关注的。图 2 给出了特高压 GIL 用环氧复合材料性能随温度变化的典型曲线。

当温度超过玻璃化转变温度后，材料的损耗、拉伸、热膨胀等性能会发生显著变化，给绝缘子安全稳定运行带来影响。因此，对特高压 GIL 用绝缘子提出性能控制指标时，玻璃化转变温度应高于其长期运行温度并留有适当裕度。由于 GIL 绝缘子存在金属–环氧粘接界面，因此绝缘材料的热膨胀系数与金属材料的热膨胀系数在数值上应相近，以此避免在 GIL 载流量变化后引发界面缺陷。

目前，特高压 GIL 用绝缘子均采用环氧–氧化铝复合材料体系，但在 252 kV 等其他低电压等级 GIL 的工程应用中，也有部分制造厂家采用环氧–氧化硅复合材料体系。表 1 比较了相同工艺下两种填料体系的各项性能，从表中可以看出，在主要性能上环氧–氧化铝和环氧–氧化硅材料差异不大，均能够满足应用要求。环氧–氧化硅能够显著降低绝缘子制造成本，具有一定的技术经济性，对于长距离 GIL 不存在开断灭弧等情况，这种配方体系也是可选的。但基于环氧–氧化硅材料的 GIL 绝缘子在存储、运输、安装时应特别保证其处于干燥环境。

近年来，随着计算机软、硬件技术的发展，分子动力学模拟技术逐步应用于环氧复合材料的性能设计、配方体系等领域[13-16]。在材料配方试验前通过分子动力学优化基材、固化剂、增韧剂等比例，可在环氧复合材料开发过程中有效减少试验次数，缩短研发周期，降低开发成本。

由于 GIL 要求可靠运行寿命为 40 年，因此其对环氧复合材料在电、热、力多因子作用下的老化性能提出较高要求。GIL 绝缘子用环氧复合材料的寿命是影响 GIL 使用寿命的关键指标之一，目前已有研究表明，通过与实际工况相等效的加速热老化及蠕变试验，特高压 GIL 中所用材料能够耐受至其设计年限[17]，但更为全面的相关性能研究还有待进一步开展。

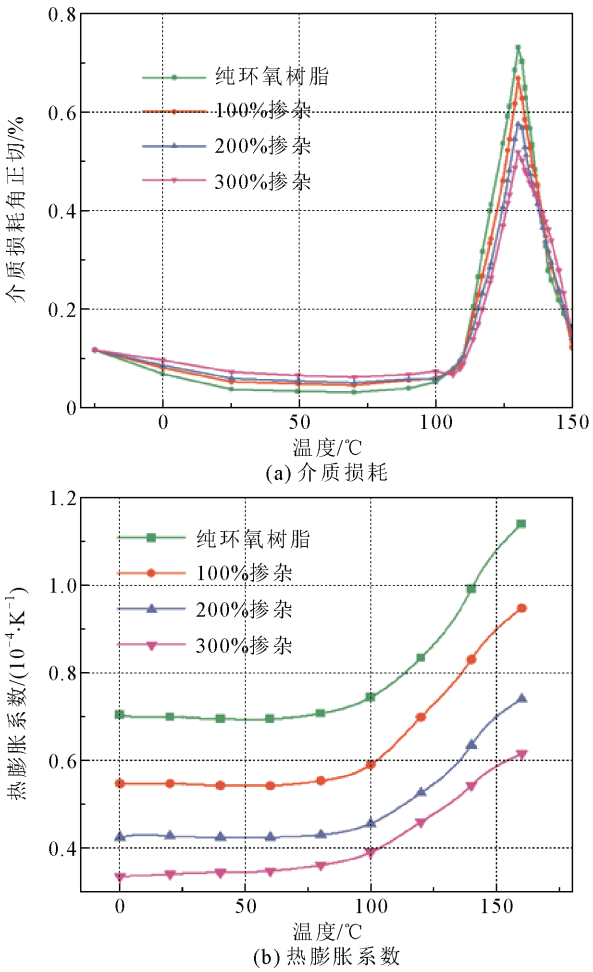


图 2 环氧复合材料性能随温度变化的典型曲线

Fig.2 Typical curves of epoxy composite properties with temperature

表 1 GIL 用环氧氧化铝和环氧氧化硅材料性能比较

Table 1 Performance comparison between DPMA and DFT algorithm

材料性能指标	性能要求	环氧–氧化铝	环氧–氧化硅
密度/(g·cm^{-3})	—	2.37	1.67
拉伸强度/MPa	≥65.00	73.97	75.25
弯曲强度/MPa	≥95.00	126.56	151.13
冲击强度/(kJ·m^{-2})	≥10.00	12.75	10.09
体积电阻率/(Ω·cm)	≥1.0×10^{15}	2.47×10^{15}	4.03×10^{15}
相对介电常数	≤6.50	4.83	3.25
介质损耗/%	≤0.70	0.50	0.41
电气强度/(kV·mm^{-1})	≥20.00	32.02	37.06
耐电弧性/s	≥180.00	187.00	181.00
玻璃化转变温度/℃	≥115.00	118.33	117.23
线膨胀系数/K^{-1}	(3.0±0.4)×10^{-5}	3.1×10^{-5}	2.9×10^{-5}

1.1.2　工艺性能研究

虽然 GIL 用环氧复合材料在完成浇注固化后具有良好的电、热、力性能，但对于大尺寸绝缘件的生产制造，还存在固化收缩导致内应力集中引发开裂、固化后绝缘件均匀性不一致等问题。即使同类环氧复合材料，采用不同的固化工艺，最终成型的浇注件性能也会有所差异。环氧树脂体系在固化反应及冷却过程中体积收缩会形成内应力，试验和运行实践表明内应力是造成环氧树脂浇注件发生微裂、空隙、强度下降的主要原因[18-19]。内应力的产生因素较多，通常环氧树脂在固化反应中要放出热量并产生应力应变，其应变与制品的体积、填料比例、脱模成功与否等有关。采用布拉格光栅在直径为 80 mm、高 70 mm 圆柱形环氧试样旋转中心测得不同氧化铝填料下典型固化收缩曲线见图 3[20]，与之对应的固化工艺流程如图 4 所示。

图 3 中不同氧化铝添加量下环氧复合材料固化收缩随时间的变化规律基本相同。为方便后文表述，在图 3 中以 A、B、C、D 分别对不同氧化铝添加量下各曲线的拐点位置进行了标注，以分析复合材料固化过程中各阶段的收缩特征及原因。从图 3 中可以看出，填料含量越低，应变曲线上的凝胶点 A 出现得越迟。结合图 3 和图 4 可以推知，B 区的尖峰主要是由于升温导致的，因此填料含量的高低对其出现的位置无影响。在 4 条应变曲线中，都能观察到脱模区域 C 的阶跃，并且填料含量越低，脱模发生的越晚，脱模时的阶跃高度越大，且脱模前所监测到的收缩应变越大。D 处出现拐点的原因在环氧材料玻璃化转变后，热膨胀系数改变导致的。

应用非等温 DSC 法，能够方便获得环氧复合材料固化过程中的放热特性。再通过计算反应动力学参数，并确定其反应模型，可以掌握特高压 GIL 用环氧复合材料的固化动力学方程，从而进一步研究复合材料的工艺性能[21-22]。图 5 给出了环氧复合材料固化动力学–热–化学–形变多物理场耦合关系，图中 $\varepsilon_{\mathrm{inel}}$ 表示为总形变，ε_0、$\varepsilon_{\mathrm{th}}$ 和 ε_{c} 分别表示外力、膨胀收缩、化学反应收缩造成的形变。$T(t)$和 $\alpha(t)$分别表示环氧复合材料的温度和固化度。通过耦合由化学反应产生的固化应变以及由温度变化产生的热应变，求取整体固化应变，由此可计算获得实际绝缘子在生产制造过程中的固化内应力分布[23]，从而指导并优化特高压 GIL 用绝缘子的制造工艺与生产流程。

结合图 3—图 5 还可以看出，图 3 中当固化流

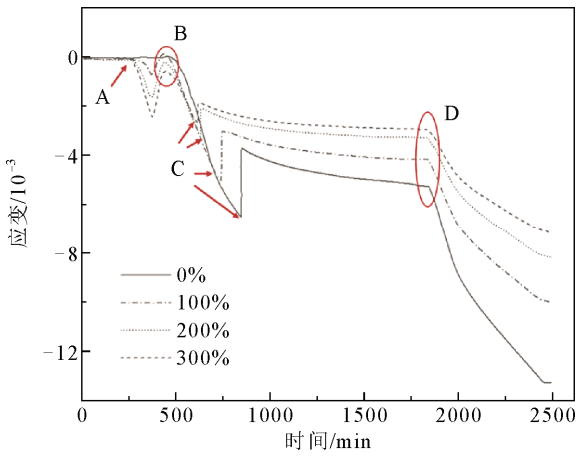


图 3　环氧复合材料典型固化收缩曲线

Fig.3　Shrinkage strain curve of epoxy composite during curing process

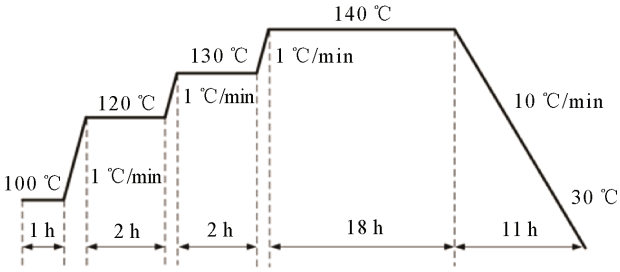


图 4　环氧复合材料固化工艺流程

Fig.4　Curing process flow of epoxy composite

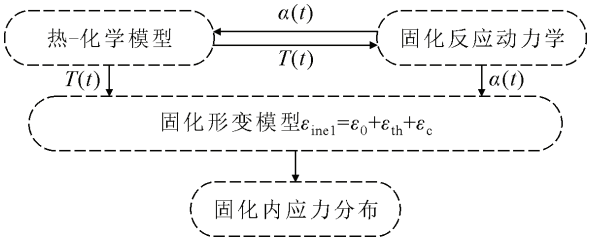


图 5　环氧复合材料固化动力学–热–化学–形变多物理场耦合关系

Fig.5　Multi-physical field coupling model of curing kinetics-thermo-chemical-deformation of epoxy composites

程达到 D 点，若此时温度不发生改变，则该处收缩应变具有饱和趋势，说明此时复合材料的固化反应已基本完成，其收缩应变不再随流程时间增加而增大；D 点以后形成的收缩应变基本为热膨胀引起。因此，比较 D 点前、后应变的变化量，即可推知固化过程中膨胀收缩和化学反应造成的应变比例。结合图 3 测试结果，在选定绝缘子浇注用环氧料并确定固化流程时，应在满足固化工艺时间与反应效率

的要求下，尽可能降低复合材料固化时的温度，以此减小浇注件固化收缩形变。

另一方面，浇注固化过程中，环氧复合材料由粘流态向橡胶态转变。为了满足大型构件的浇注成型要求，环氧复合材料具有一定浇注可使时间，使其在一定温度和时间范围内能够保持在粘流态，对其固化过程中不同阶段的粘度也有考量。

此外，填料的沉降有可能造成绝缘子不同部位的材质不均匀，通过合理的工艺方法能够抑制这种现象[24-27]。苏通综合管廊中对特高压 GIL 绝缘子的均匀性提出严格要求，通过不同绝缘子不同部位的片析检查，要求非浇口部位填料含量偏差≤2%，密度差≤0.2 g/cm^3，以此控制绝缘子材质均匀性。

根据以上研究，开发了大型浇注件内应力调控技术，保障了 GIL 绝缘件制造成品率。目前，国内已有适用于 GIL 绝缘子制造的国产环氧复合材料配方体系，并已应用于高压、超高压电压等级，材料性能基本满足特高压 GIL 绝缘子的技术规范要求，进一步推进国产环氧配方体系在实际特高压工程中的应用需要持续研究和关注。

1.2 界面效应与界面材料

特高压 GIL 绝缘子中心导体、金属嵌件与环氧复合材料存在固–固界面，如图 6 所示。在实际生产中，该界面是绝缘子固化收缩的应力集中面，也是产生微裂的引发点。电极–环氧粘接界面剥离、界面裂纹等缺陷存在的情况下可能会导致严重的放电现象[28-32]，同时粘接界面也减弱了环氧复合材料的力学性能[33]，可能危害 GIL 安全稳定运行。

为加强金属–环氧粘接界面力学性能，降低特高压 GIL 绝缘子水压试验等破坏性试验结果的分散性，金属界面一般需经过喷砂、除油、酸洗、偶联处理等工艺流程，此后直接浇注或在金属件上涂敷界面剂后浇注。通常界面处理材料分为环氧类和橡胶类，橡胶类配方应力缓冲能力更强，而粘接能力相对较弱。环氧类配方粘接能力强，而缓冲能力较弱。此外，有时还会向界面剂中添加导电填料，一方面可以均匀粘接界面的电场分布，如图 7 所示。另一方面期望界面发生剥离时，半导电界面剂能够粘附在环氧复合材料一侧，屏蔽气隙电场[34]。

基于以上两方面考虑，研究选用环氧树脂作为基体，固化剂选择胺类固化剂，丁晴橡胶作为增韧剂，添加炭黑增加导电性能，溶剂使用丙酮。通过测试获得界面材料和铝导体之间的剪切强度为 15.73 MPa，直流电阻率为 4.5×10^7 Ω·cm，弹性模量小于环氧复合材料本体，满足设计要求[35-37]。

界面涂敷后浇注成型的盆式绝缘子水压破坏形貌如图 8 所示。盆式绝缘子的水压破坏值达 3.65 MPa，高于其使用原有界面材料时 3.1 MPa 的平均值，远高于不使用界面材料时 2.0 MPa 的水压值。从破坏形貌中可以看出，其破坏起始点位于盆式绝缘子边缘，并向两侧延展。中心导体周围依然有盆体包覆，未出现导体剥离的现象，说明导体与盆体之间依靠界面材料结合完好，此时绝缘子的破坏不是由金属–环氧粘接界面剪切滑脱引起，界面涂敷材料达到了预期效果。

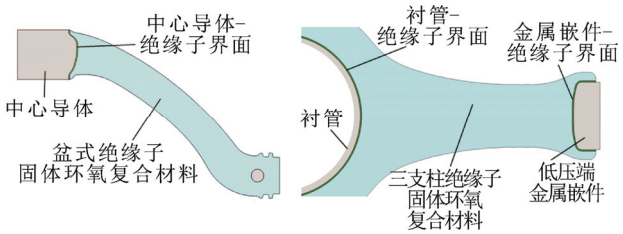


图 6 特高压 GIL 绝缘子金属–环氧粘接界面

Fig.6 Metal-epoxy bonding interface of UHV GIL insulators

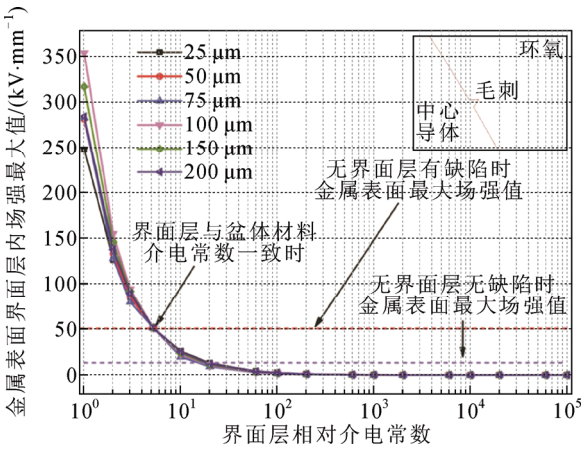


图 7 半导电界面层对绝缘子粘接界面缺陷的屏蔽能效[33]

Fig.7 Shielding efficiency of semi-conductive interface layer for defects in insulator bonding interface[33]

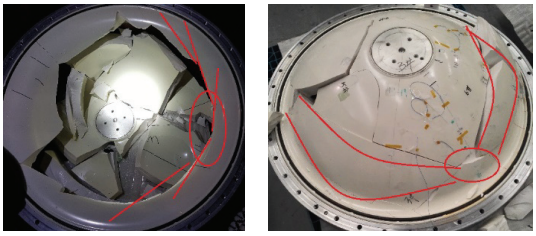


图 8 特高压盆式绝缘子水压试验破坏形态

Fig.8 Failure mode of UHV spacer after hydraulic test

2　特高压 GIL 关键组部件结构设计

GIL 关键组部件结构设计应使其多物理场分布均匀化，将电、热、力各项性能指标控制在许用范围内。由于绝缘子在运行环境下同时受到电、热、力的耦合作用，特高压 GIL 设计需开展多物理场仿真及其多参数、多目标结构协同优化研究。此外，作为长距离 GIL 的基本结构，18 m 长标准单元还需考虑管母挠度、热致伸缩等问题，以此提出绝缘子选型与布置、伸缩节补偿、微粒捕获、载流连接结构寿命等解决方案，为特高压 GIL 组部件的设计制造、运输安装、运行维护提供支撑。

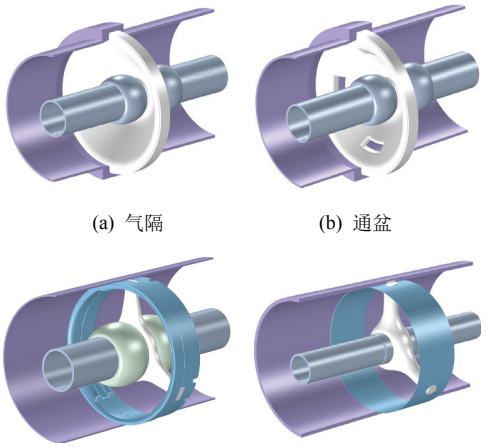
2.1　多物理场仿真及结构优化

2.1.1　多物理场仿真及校核

绝缘子是 GIL 的核心部件，起到支撑导体和电气绝缘的作用。特高压 GIL 中的绝缘子可分为盆式绝缘子和支柱绝缘子两类，包括气隔绝缘子、气通绝缘子、三叉星形绝缘子和三支柱绝缘子，如图 9 所示。支柱绝缘子可利用滚轮装置实现支腿端部与壳体的相对滑动，或通过压环装置实现导杆与衬管的相对滑动，以补偿因载流管母热胀冷缩而出现与外壳的相对位移。

绝缘结构方面，特高压 GIL 设计中需要将各部位的场强控制在合理范围内，最大程度减小放电发生的可能性。根据工程经验和特高压 GIL 运行条件，得到特高压 GIL 用绝缘子关键部位的控制场强如表 2 所示。结合图 6 可知，其中金属–环氧粘接界面控制指标为盆式绝缘子中心导体、三支柱绝缘子中心衬筒和金属嵌件等关键部位的表面电场。与特高压 GIS 相比，为严格考虑，GIL 绝缘子气–固界面切向场强最大值控制在 11 kV/mm 以下。电场仿真计算结果表明，绝缘子电场分布与其电极布置、结构形态等有关，绝缘子某一个结构参数改变可能会引发多个绝缘设计指标的变动，控制相关影响并分析规律能够为绝缘子结构优化设计提供基础[38]。

特高压 GIL 的力学性能和温度场分布也需要关注[39-40]，特高压 GIL 多物理场分布校核结果如图 10 所示。由于苏通 GIL 综合管廊工程中的竖井段主要采用三支柱绝缘子，三支柱绝缘子的力学校核还需考虑垂直受力的情况。水平和垂直布置时三支柱绝缘子表面应力场分布最大值分别出现在绝缘子腹部和支腿根部位置，其表面应力值小，有一定的设计裕度。盆式绝缘子主要考核其水压试验情况，该条



(a) 气隔　(b) 通盆　(c) 三支柱绝缘子　(d) 三叉星形绝缘子

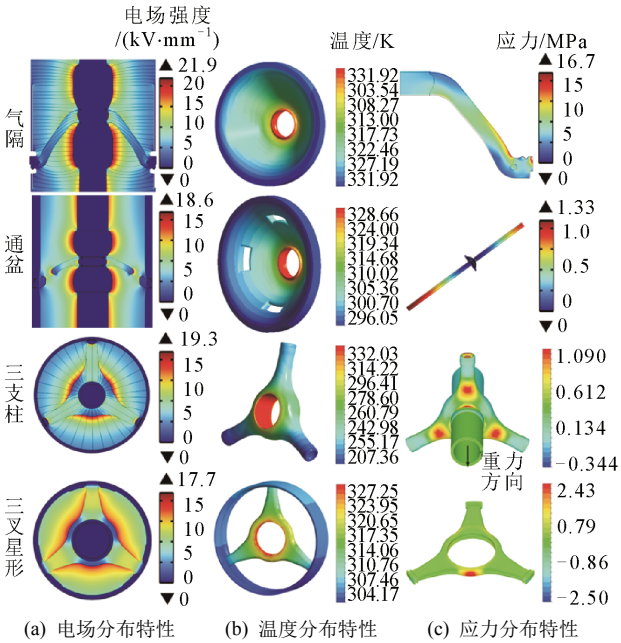
图 9　特高压 GIL 用绝缘子结构

Fig.9　Insulator structure of UHV AC GIL

表 2　特高压 GIL 绝缘子关键部位控制场强

Table 2　Critical field strength of key position of UHV GIL

位置	电压形式	幅值/kV	控制场强 /(kV·mm^{-1})
金属–环氧粘接界面	额定相电压有效值	635	3
绝缘子表面/金属件表面合成场强	雷电冲击电压峰值	2400	24
绝缘子表面切向场强	雷电冲击电压峰值	2400	11



(a) 电场分布特性　(b) 温度分布特性　(c) 应力分布特性

图 10　特高压 GIL 绝缘子多物理场仿真

Fig.10　Multi-physical field simulation of UHV GIL insulator

件下表面第一主应力最大值出现在靠近法兰的边沿倒角处，应力集中位置与盆式绝缘子水压破坏起始位置能够对应，进一步优化此处应力分布能够一定

程度上提升盆式绝缘子力学性能。

温升性能方面，绝缘子表面温度应低于绝缘材料的玻璃化转变温度并留有裕度，GIL 中插接结构可参考《DL/T 593—2016 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》，在 SF_6 气体中触头处温度不超过 105 ℃，空气温升不超过 65 ℃；导体温度最高为 90 ℃，周围空气温度不超过 40 ℃[41]。校核结果表明，通流 6300 A 后正常运行工况下温升性能能够满足要求。

2.1.2 绝缘结构优化设计

根据苏通综合管廊 GIL 电场设计指标要求，若参照 550 kV 电压等级三支柱绝缘子设计，金属嵌件处电场强度最大值较高，可达到 3.88 kV/mm，而按照苏通综合管廊工程 GIL 设计要求，此处电场强度应不超过 3.00 kV/mm。为降低嵌件表面场强，且不显著影响其他部位电场分布，并考虑了三支柱绝缘子的力学性能，创新性提出了“哑铃型”三支柱绝缘子结构方案如图 11 所示。与原有结构相比，哑铃型三支柱绝缘子在距离三支柱绝缘子支腿顶部一定位置处，将支腿向内收缩，形成倒锥型结构。哑铃型结构能够有效降低金属嵌件表面电场强度，与原结构相比，哑铃型结构金属嵌件表面电场强度下降了 27.9%，有效改善了电场分布[42]。

特高压 GIL 三支柱绝缘子和盆式绝缘子表面均为多段圆弧相切的复杂轮廓，若直接通过 CAD 建模并更改参数，圆弧之间相互影响可能导致模型重构困难，且优化参数不易选取。研究采用非均匀有理 B 样条曲线或伯恩斯坦方程对轮廓进行数学描述，控制样条曲线的拟合点或方程系数来调整几何参数，从而简化了参数数量，免去了相切约束繁琐复杂的表达方式[43-46]，特高压 GIL 绝缘子轮廓重构及相关待优化参数的示意图如图 12 所示。图中所示 P_1—P_7 表示采用非均匀有利 B 样条曲线对轮廓形状重构时样条所用的拟合点及其坐标。基于此提出了特高压 GIL 绝缘子多目标、多参数优化设计方法，表 3 和表 4 分别给出了优化后三支柱绝缘子和盆式绝缘子关键性能指标。其中电场强度为 2400 kV 雷电冲击电压下的计算结果，盆式绝缘子应力最大值为 1 MPa 水压条件下的计算结果。表中仅给出优化时重点关注的指标，其余指标也均满足设计要求。

从表中可以看出，相关指标均得到较大改善：优化后的三支柱绝缘子金属嵌件表面的电气性能明显改善，尽管切向场强略微升高，但仍在控制值范围内。盆式绝缘子表面电场强度最大值下降至 10.9 kV/mm，盆面最大第一主应力也均显著下降。

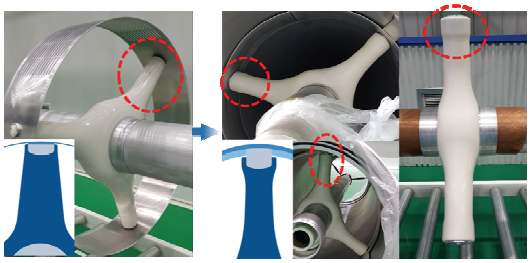


图 11 哑铃型三支柱绝缘子结构

Fig.11 Dumbbell type three post insulator construction

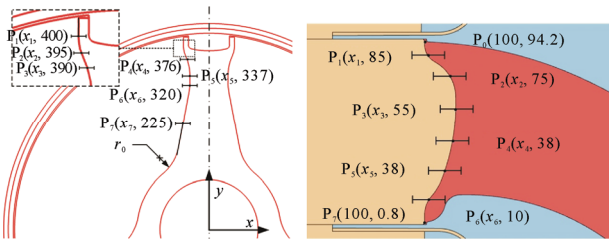


图 12 特高压 GIL 绝缘子结构轮廓重构

Fig.12 Structural profile reconstruction of UHV GIL insulator

表 3 特高压 GIL 三支柱绝缘子优化结果

Table 3 Optimization results of UHV GIL tri-post insulator

优化指标	表面最大合成电场 /(kV·mm⁻¹)	表面最大切向电场 /(kV·mm⁻¹)	金属嵌件表面最大电场 /(kV·mm⁻¹)
初始设计	18.4	8.7	14.7
优化结构	17.3	9.1	9.1

表 4 特高压 GIL 盆式绝缘子优化结果

Table 4 Optimization results of UHV GIL spacer

优化指标	表面最大合成电场/(kV·mm⁻¹)	表面最大切向电场/(kV·mm⁻¹)	盆面最大第一主应力/MPa
初始设计	12.6	10.3	24.2
优化结构	10.9	9.8	13.3

2.2 单元配置

GIL 绝缘子配置方式主要考虑绝缘子布置间距、绝缘子周围金属微粒捕获装置两个重要方面。

为方便故障检修和运行维护，需通过盆式绝缘子将 GIL 分隔为不同气室，气室内通过三支柱绝缘子支承中心导体。苏通 GIL 综合管廊将 108 m 管线分隔为一个完整气室，气室下每 18 m 分隔为一标准单元。结合多物理场仿真计算，表 5 给出了 GIL 中心导体受不同挠度时导电杆表面电场强度最大值。

从表中可以看出，随着挠度增大，导电杆表面电场强度最大值显著增长。因此，尽管绝缘子在力

表 5　不同挠度下 GIL 中心导体表面的电场强度最大值

Table 5　Maximum electric field strength of center conductor under different deflections

挠度/mm	0	0.3	1	5	10
最大场强/(kV·mm^{-1})	16.18	16.21	16.27	16.38	17.27

学的结构设计上具有一定裕度，考虑到母线间隙处的电场分布，单元内应配置合适数量的支撑绝缘子。图 13 给出了特高压 GIL 苏通综合管廊绝缘子气室及固定三支柱–滑动三支柱绝缘子配置方案[47-48]。

标准单元共有两种绝缘子配置方案：①固定三支柱–滑动三支柱配置方案：每个基础单元两侧设置固定三支柱绝缘子，中间每隔 6 m 设置一个滑动三支柱绝缘子；②通气式盆式绝缘子–三叉星形绝缘子配置方案：每个基础单元两侧设置通气式盆式绝缘子，单元中点设置三叉星形绝缘子。绝缘子数量主要由载流中心导体的挠度所决定，由于三叉星形绝缘子设计承受的中心导体直径大于三支柱绝缘子设计，因此其在基础单元中绝缘子间的间隔可相对较远。其中，滑动三支柱绝缘子和三叉星形绝缘子具备中心导体相对壳体滑移的功能，而不受固定约束，配合滑动触头的轴向伸缩量，能够补偿导体在负荷、外界环境温度变化条件下导电杆引起的热致伸缩。

金属微粒是威胁特高压 GIL 安全稳定运行的重要因素之一，触头、滑动的支柱绝缘子等接触磨损以及运输条件、装配环境等是金属微粒的主要来源[49-50]。特高压 GIL 在三支柱绝缘子、三叉星形绝缘子的底部，以及盆式绝缘子的凹面、凸面均布置了微粒陷阱。图 14 展示了特高压 GIL 绝缘子用的两种不同结构微粒陷阱。两种微粒陷阱的形式均为栅格型，不同之处在于栅格是否交错以及栅格的尺寸大小。

根据 GIL 内金属微粒运动特性仿真研究结果[50]，当施加电压值不高时，金属微粒主要在筒壁和捕捉器附近低振幅跳跃，不会运动至绝缘子表面；但当电压较高时，金属微粒可能接触绝缘子，使捕捉器失效。因此，电压升高至现场耐压试验电压之前，可对每个老炼阶段加压值和加压时间进行设计，相当于缓慢地阶梯升压。据此可规定阶梯加压的老练阶段，提出现场试验的加压程序[7]。该方法有助于微粒捕捉器对不同尺寸的微粒进行捕获，而不至于存在迅速升高的电压使微粒跳跃至绝缘子表面。

2.3　滑动触头接触特性

GIL 在冷启动、环境温度波动及载流量变化时，

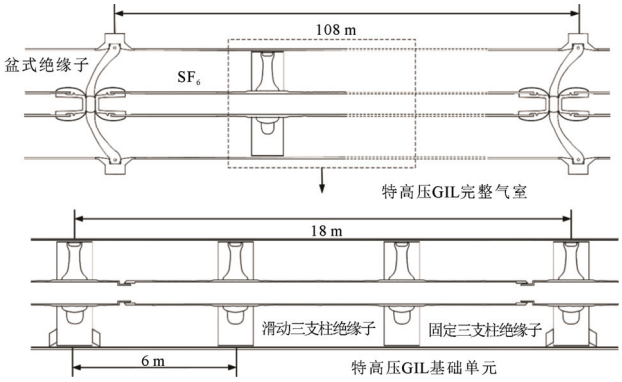


图 13　特高压 GIL 配置方式

Fig.13　Configuration mode of UHV GIL unit

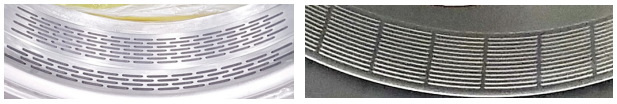
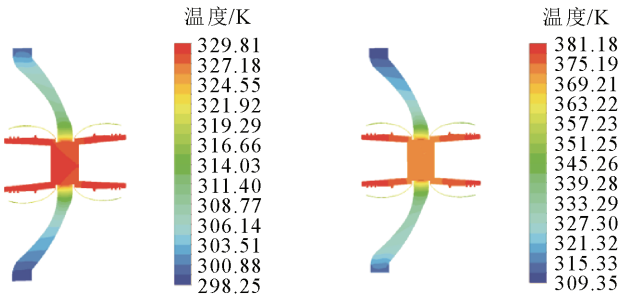


图 14　特高压 GIL 绝缘子用微粒陷阱

Fig.14　Particulate traps for UHV GIL insulators

由于中心导电和壳体热胀冷缩会产生热致伸缩现象[51-52]，对此应用滑动触头补偿相对位移。特高压温升试验结果表明，当中心导杆载流达到 6930 A 时，中心导杆的温升约 44.78 ℃。通过热膨胀计算，获得了该温度下的导杆轴向热膨胀量约 18.4 mm。因此运行工况下，滑动触头将长时往复运动，造成弹簧触指磨损，接触电阻升高。图 15 对比了接触电阻劣化前及劣化 100 倍时的温度场分布。从图中可以看出，当接触电阻劣化 100 倍时，插接结构附近最高温上高了约 51 K，低压端金属法兰处温度上升了约 9 K。此时已超过设计要求，可能引发热故障或绝缘失效，危害系统安全运行。

为避免在设计年限内 GIL 载流连接结构磨损严重造成热故障，需开展通流触指的接触特性寿命试验和结构选型研究。开关设备中用于电接触的触指主要有 3 种，第 1 种为梅花弹簧触指，第 2 种为螺旋弹簧触指，第 3 种为表带弹簧触指，如图 16 所示。苏通 GIL 综合管廊工程中主要应用前两种触指型式。为考核触头 15 000 次滑动机械寿命，确定触指结构，设计了滑动触头寿命考核试验装置，考虑严苛工况下作动系统的摩擦行程选择 40 mm，运行时 SF_6 气压为 0.45 MPa，对其机械磨损条件下触指的接触电阻、磨损特性、磨损机理及结构选型开展了深入分析[53]。结果表明，梅花触指和螺旋弹簧触指结构均能够满足工程设计寿命要求，但弹簧触指在



(a) 劣化前 (b) 劣化100倍

图 15 接触电阻劣化前后滑动触头处的温度场分布

Fig.15 Temperature field distribution at sliding contacts before and after contact resistance deterioration



(a) 梅花触指 (b) 弹簧触指 (c) 表带触指

图 16 开关设备中用于电接触的触指型式

Fig.16 Different types of contact finger used for electrical contact in switchgear equipment

机械寿命试验后接触电阻变为试验前的 4 倍，而梅花触指接触电阻则在 1~1.5 倍之间波动。

3 特高压 GIL 绝缘与放电特性

1100 kV 苏通 GIL 综合管廊工程带电调试初期，现场耐压试验和试运行过程中 GIL 内部发生过放电现象，涉及绝缘子闪络、内部绝缘击穿和间隙放电；暂态电压波形监测结果还表明，单次试验中首次放电后还出现了次生放电[54-55]。这为绝缘子考核评估、故障定位、过电压防护提出了更高要求。尽管苏通 GIL 综合管廊工程正式投运以来，已零故障运行两年有余，但对其长期运行可靠性及绝缘失效的研究还需持续开展。

在特高压 GIL 盆式绝缘子中心导体与盆体的界面处，预置缺陷等效模拟固–固界面处气隙尖端在运行中的电场集中现象，并加压破坏。当试验电压达到 840 kV 时可检测到较大的局部放电信号，随着电压进一步升高，最终盆式绝缘子发生击穿，破坏后形貌如图 17 所示。从图 17 中可以看出，放电通道没有贯穿绝缘沿面，而是在绝缘子表面形成了不连续的黑色裂痕。裂痕在低压侧居多，并出现了孔洞，进一步解剖获得绝缘破坏形貌及绝缘子电场分布如图 18 所示。

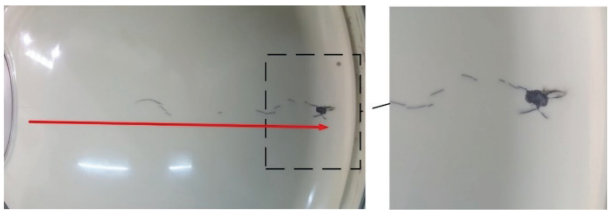


图 17 特高压 GIL 盆式绝缘子击穿后的破坏形貌

Fig.17 Damage morphology of UHV GIL basin insulator after breakdown

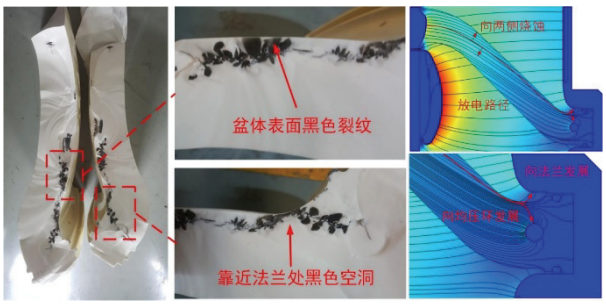


图 18 解剖后的绝缘子破坏形貌[46]

Fig.18 Damage morphology of insulator after dissection[46]

从图 18 可以看出，放电的路径与仿真计算得到的盆式绝缘子电力线发展方向相似。在绝缘内部的放电通道上，存在许多扇形、黑色的环氧材料烧蚀碳化区域，并沿着主路径向两侧扩展；当放电通道发展至绝缘子表面时，穿出绝缘子并在沿面进一步发展。但在此过程中仍会进入绝缘子本体中，使绝缘子表面形成不连续的裂痕。绝缘子内部缺陷导致了电场集中，诱发该处发生严重局部放电，并最终造成绝缘破坏。

另外，当绝缘子气–固表面存在金属微粒时将畸变局部电场分布，是严重影响 GIL 安全稳定运行的关键因素之一，长期运行下微粒对气–固绝缘的影响需重点关注。特高压 GIL 三支柱绝缘子金属异物沿面放电的真型试验研究表明[56]：毫米级微粒在特高压 GIL 的运行条件下或不会引发严重的局部放电，5 mm 微粒引起的局部放电量甚至小于 1 pC，但在长期运行下会导致气–固界面表面电荷积聚，从而增大沿面放电的可能性。

目前，针对气体绝缘设备气–固沿面放电、固体绝缘内部放电的研究多采用试样模拟，大型绝缘件在多因素作用下的长程沿面放电、绝缘子本体击穿的试验研究甚少。为提升特高压 GIL 绝缘可靠性，还需进一步开展绝缘缺陷检测、工艺质量提升、故障状态预警、多因素等效考核等方面的深入研究。

4　结论

1）特高压 GIL 用环氧复合材料研发需重点关注其电气性能、机械性能、理化性能及其随温度的变化特性，考虑内应力的固化工艺性能研究也十分必要。研究对比了添加氧化铝或氧化硅的环氧复合材料性能，考虑到 GIL 内不存在灭弧、熄弧等问题，未来 GIL 亦可采用环氧–氧化硅作为绝缘子材料以降低成本。通过环氧复合材料电、热、力及工艺性能研究，为特高压 GIL 绝缘子多物理场仿真校核计算提供了参数基础，有力支撑了苏通综合管廊工程特高压 GIL 绝缘件环氧复合材料选型及相关标准规范制定。

2）半导电界面材料具有均匀金属–环氧粘接界面电场、释缓界面应力的作用，能够提高绝缘子的运行可靠性。仿真结果表明，涂覆半导电界面材料可屏蔽金属−环氧粘接界面凸起、凹陷等缺陷。开发了以环氧为基体，以丁晴橡胶为增韧剂，填充炭黑的半导电界面材料，通过盆式绝缘子水压试验结果表明，其效增强了界面粘接强度，并提升盆式绝缘子水压破坏值的一致性，为特高压 GIL 绝缘子工程应用提供了支撑。

3）通过电、热、力校核及关键结构参数分析，提出了“哑铃型”三支柱绝缘子结构，开发了基于非均匀有理 B 样条的多参数、多目标复杂轮廓优化方法，优化设计的盆式绝缘子和三支柱绝缘子性能显著提升，解决了 GIL 高可靠绝缘设计难题。

4）特高压 GIL 采用滑动触头连接补偿导体膨胀伸缩，绝缘子配置微粒捕捉器，设置 18 m 为基础单元，108 m 为气室。分析了特高压 GIL 单元的绝缘子配置方式，完成了真型滑动触头寿命试验。梅花触头及弹簧触头15 000次机械磨损下均能满足寿命设计要求，梅花触头的接触电阻劣化情况优于弹簧触头，满足了苏通特高压 GIL 工程要求

5）探究了特高压 GIL 放电现象，内部缺陷的存在将诱发绝缘子产生局部放电，并在稍高于运行电压下引发了绝缘子的内部击穿；绝缘子沿面毫米级金属微粒在运行电压下局放量小，可能对出厂试验、交接试验的检测造成困难，但在长期运行中或引发放电故障。

目前，GIL 在不同电压等级广泛应用，但绝缘子环氧复合材料国产化、绝缘子制造缺陷检测、多工况等效试验考核、运行状态感知与长期寿命评估、三相共箱式 GIL 等方面还需持续深入研究。此外，海上风电、柔性直流、城市配网等场景下直流 GIL 关键技术，以及双碳背景下新型环保绝缘气体 GIL 攻关等也亟待研究开展，以推动我国引领先进 GIL 输电装备升级和技术创新。

参考文献　References

[1] 范建斌. 气体绝缘金属封闭输电线路及其应用[J]. 中国电力，2008，41(8)：38-43.
FAN Jianbin. Gas insulated metal enclosed transmission line (GIL) and its application[J]. Electric Power, 2008, 41(8): 38-43.

[2] 李　鹏，李志兵，孙　倩，等. 特高压气体绝缘金属封闭输电线路绝缘设计[J]. 电网技术，2015，39(11)：3305-3312.
LI Peng, LI Zhibing, SUN Qian, et al. Research on insulation design of UHV gas-insulated metal-enclosed transmission line[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3305-3312.

[3] 李　鹏，颜湘莲，王　浩，等. 特高压交流 GIL 输电技术研究及应用[J]. 电网技术，2017，41(10)：3161-3167.
LI Peng, YAN Xianglian, WANG Hao, et al. Research and application of UHVAC gas-insulated transmission line[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3161-3167.

[4] 班连庚，孙　岗，项祖涛，等. 特高压苏通综合管廊工程 GIL 系统工作条件[J]. 电网技术，2020，44(6)：2386-2392.
BAN Liangeng, SUN Gang, XIANG Zutao, et al. System conditions of UHV GIL in sutong utility tunnel project[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2386-2392.

[5] 陈　双，刘　焱，卞　超，等. 特高压交流 GIL 出厂试验技术综述[J]. 中国电力，2020，53(12)：151-158.
CHEN Shuang, LIU Yan, BIAN Chao, et al. A review of UHV AC GIL ex-factory test technology[J]. Electric Power, 2020, 53(12): 151-158.

[6] 刘泽洪，韩先才，黄　强，等. 长距离、大容量特高压 GIL 现场交流耐压试验技术[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4172-4181.
LIU Zehong, HAN Xiancai, HUANG Qiang, et al. Field AC withstand voltage test technology of long distance and large capacity UHV GIL[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4172-4181.

[7] 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 Chenyu, LU Shujun, et al. Key technical parameters of UHV GIL in sutong utility tunnel project[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2377-2385.

[8] 武庆周，罗春明，彭宗仁，等. 应用宽频介电谱研究氢氧化铝/环氧树脂复合材料的 α 和 β 松弛行为[J]. 复合材料学报，2018，35(6)：1497-1502.
WU Qingzhou, LUO Chunming, PENG Zongren, et al. Broadband dielectric Spectroscopy on α and β relaxation of aluminum trihydroxide/epoxy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(6): 1497-1502.

[9] LI Z, OKAMOTO K, OHKI Y, et al. Effects of Nano-filler Addition on partial discharge resistance and dielectric breakdown strength of micro-Al_2O_3Epoxy composite[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3): 653-661.

[10] GUO Z H, TIAN H D, LI H, et al. Effect of release agent on arc ablation resistance of epoxy resin[C] // 2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP). Fort Worth, USA: IEEE, 2017: 732-735.

[11] 方俊鑫，殷之文. 电介质物理学[M]. 北京：科学出版社，1989.
FANG Junxin, YIN Zhiwen. Dielectric physics[M]. Beijing, China: China Machine Press, 1989.

[12] 陈　平，王德中. 环氧树脂及其应用[M]. 北京：化学工业出版社，2004.
CHEN Ping, WANG Dezhong. Epoxy resin and its application[M].

Beijing, China: Chemical Industry Press, 2004.

[13] 张晓星，陈霄宇，肖　淞，等. 改性 SiO_2 增强环氧树脂热力学性能的分子动力学模拟[J]. 高电压技术，2018，44()：740-749.
ZHANG Xiaoxing, CHEN Xiaoyu, XIAO Song, et al. Molecular dynamics simulation of thermal-mechanical properties of modified SiO_2 reinforced epoxy resin[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 740-749.

[14] 郝留成，袁端鹏，陈　蕊，等. 复配固化剂对环氧树脂体系特性影响的分子动力学模拟[J]. 绝缘材料，2021，54(1)：73-77.
HAO Liucheng, YUAN Duanpeng, CHEN Rui, et al. Molecular dynamics simulation on effect of compound curing agent on properties of epoxy resin system[J]. Insulating Materials, 2021, 54(1): 73-77.

[15] 邵　帅，何俊凌，余永松，等. 环氧树脂/酸酐体系热力学特性的分子动力学模拟[J]. 绝缘材料，2020，53(8)：38-43.
SHAO Shuai, HE Junling, YU Yongsong, et al. Molecular dynamics simulation on thermomechanical properties of epoxy resin/anhydride system[J]. Insulating Materials, 2020, 53(8): 38-43.

[16] 赵云晓，赵书涛，谢　庆，等. 基于 MD 模拟的 DGEBA 平均分子量对环氧树脂热机械性能的影响[J]. 高电压技术，2019，45(9)：2766-2773.
ZHAO Yunxiao, ZHAO Shutao, XIE Qing, et al. Effect of average molecular weight of DGEBA based on MD simulation on properties of crosslinked epoxy resin[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2766-2773.

[17] 陈　允，崔博源，黄常元，等. 特高压 GIL 用绝缘子材料寿命试验及预测[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4106-4112.
CHEN Yun, CUI Boyuan, HUANG Changyuan, et al. Life test and prediction of insulator materials for UHV GIL[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4106-4112.

[18] 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.

[19] 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 Zhouyi'ao, et al. Application and prospect of ultrasonic testing technology for stress in GIS basin insulators[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(1): 13-20.

[20] 王浩然. 特高压交流 GIS 盆式绝缘子电气机械特性研究与绝缘结构优化设计[D]. 西安：西安交通大学，2018.
WANG Haoran. Research on electrical and mechanical properties and insulation structure optimization of UHV AC GIS spacer[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2018.

[21] 李紫璇，丁　克，郝留成，等. 特高压气体绝缘金属封闭开关设备用 Al_2O_3/环氧树脂复合材料的非等温固化动力学及蠕变性能[J]. 复合材料学报，2020，37(3)：562-572.
LI Zixuan, DING Ke, HAO Liucheng, et al. Non-isothermal curing kinetics and creep behavior of Al_2O_3/epoxy composites for extra-high vlotage gas insulated switchgear[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(3): 562-572.

[22] 毕全瑞，郝留成，袁端鹏，等. 盆式绝缘子用环氧/氧化铝复合体系固化动力学[J]. 高电压技术，2019，45(9)：2758-2765.
BI Quanrui, HAO Liucheng, YUAN Duanpeng, et al. Curing kinetics of epoxy/alumina composite system for basin insulator[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2758-2765.

[23] 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.

[24] 陈承相，李永飞，郝留成，等. 1100 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 1100 kV GIS insulator during curing[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4992-5000.

[25] 赵玉顺，闫　程，王学培，等. APTES 对环氧树脂/Al_2O_3 复合材料填料沉降和性能的影响[J]. 高电压技术，2022，48(3)：848-856.
ZHAO Yushun, YAN Cheng, WANG Xuepei, et al. Effect of APTES on sedimentation and properties of epoxy resin/Al_2O_3 composites fillers[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 848-856.

[26] 黄孙息，冯羽风，唐小青，等. 粉体粒径及形状对导热环氧浇注胶性能的影响研究[J]. 绝缘材料，2016，49(6)：40-44.
HUANG Sunxi, FENG Yufeng, TANG Xiaoqing, et al. Effect of particle size and shape of inorganic powder on properties of thermal conductive epoxy casting resin[J]. Insulating Material, 2016, 49(6): 40-44.

[27] 王学培. GIS 设备用环氧复合绝缘材料中微米氧化铝沉降的抑制方法研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2020.
WANG Xuepei. Study on the method of restraining the deposition of micro alumina in epoxy composite insulating material for GIS equipment[D]. Hefei, China: Hefei University of Technology, 2020.

[28] 刘　鹏，吴泽华，朱思佳，等. 缺陷对交流 1100 kV GIL 三支柱绝缘子电场分布影响的仿真[J]. 电工技术学报，2022，37(2)：469-478.
LIU Peng, WU Zehua, ZHU Sijia, et al. Simulation on electric field distribution of 1100 kV AC tri-post insulator influenced by defects[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 469-478.

[29] WU Z H, TIAN H D, ZHU S J, et al. In-situ observation of electrical tree evolution in epoxy dielectrics with internal cracks[J]. High Voltage, 2021, 6(2): 210-218.

[30] GUO Z H, WU Z H, WANG H R, et al. Experimental and numerical study on formation of interface separation and interfacial dielectric strength of GIL insulator[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(6): 1738-1746.

[31] CHENG J R, XU Y, DING D W, et al. Investigation of sensitivity of the ultra-high frequency partial-discharge detection technology for micro-crack in epoxy insulator in GIS[J]. High Voltage, 2020, 5(6): 697-703.

[32] 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.

[33] WANG C, SUN Q, ZHAO L, et al. Mechanical and dielectric strength of laminated epoxy dielectric graded materials[J]. Polymers, 2022, 12(3): 622.

[34] 王　闯，赵　朗，孙　青，等. 界面涂层对特高压 GIS 盆式绝缘子导体-绝缘盆体界面处电场调控[J]. 高电压技术，2020，46(3)：799-806.
WANG Chuang, ZHAO Lang, SUN Qing, et al. Interface coating to regulate electric field at the interface of central conductor and insulation basin of UHV GIS spacer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 799-806.

[35] 王　闯. 特高压交流 1100kV GIS 盆式绝缘子的界面效应研究[D]. 西安：西安交通大学，2017.
WANG Chuang. Research on interfacial effect of 1100kV GIS spacer used in UHV AC[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2017.

[36] 王　闯，孙　青，贾　静，等. 端羟基液态丁腈橡胶对室温固化环氧树脂热学和电学性能的影响[J]. 中国电机工程学报，2020，40(10)：3368-3376.
WANG Chuang, SUN Qing, JIA Jing, et al. Thermal and electrical properties of room temperature cured epoxy resin modified by hydroxyl-terminated liquid nitrile butadiene rubber[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3368-3376.

[37] WANG C, LI H, ZHANG H L, et al. Influence of addition of hydroxyl-terminated liquid nitrile rubber on dielectric properties and relaxation behavior of epoxy resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(4): 2258-2269.

[38] 吴泽华，王浩然，田汇冬，等. 特高压 GIL 三支柱绝缘子结构参数分析与优化[J]. 高电压技术，2018，44(10)：3165-3173.
WU Zehua, WANG Haoran, TIAN Huidong, et al. Structural parameter analysis and optimization of tri-post insulator on UHVAC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3165-3173.

[39] 张施令，彭宗仁，王浩然，等. 盆式绝缘子多物理场耦合数值计算及结构优化[J]. 高电压技术，2020，46(11)：3994-4005.
ZHANG Shiling, PENG Zongren, WANG Haoran, et al. Numerical calculation and structural optimization of multi-physical field coupling for basin insulator[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3994-4005.

[40] 高　璐，贾云飞，汲胜昌，等. 环保型 1100kV GIL 用三支柱绝缘子多物理场耦合仿真及校核[J]. 高电压技术，2020，46(3)：987-995.
GAO Lu, JIA Yunfei, JI Shengchang, et al. Multi-physical field coupling simulation and verification of tri-post insulator on environment-friendly 1100 kV GIL[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 987-995.

[41] 国家能源局. 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求：DL/T 593—2016[S]. 北京：中国电力出版社，2016.
National Energy Administration of China. Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards: DL/T 593—2016[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2016.

[42] 彭宗仁，郭子豪，王浩然，等. 一种用于超/特高压 GIL 的哑铃型三支柱支撑绝缘子：207250241U[P]. 2018-04-17.
PENG Zongren, GUO Zihao, WANG Haoran, et al. A dumbbell type tri-post insulator for UHV / UHV GIL: 207250241U[P]. 2018-04-17.

[43] 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.

[44] 彭宗仁，吴泽华，田汇冬，等. 基于粒子群算法的 GIL 三支柱绝缘子电气性能优化设计方法：108984978A[P]. 2018-12-11.
PENG Zongren, WU Zehua, TIAN Huidong, et al. Electrical performance optimization design method of GIL tri-post insulator based on particle swarm optimization: 108984978A[P]. 2018-12-11.

[45] 贾云飞，高　璐，汲胜昌，等. 基于有限元仿真和遗传算法的 1100kV 盆式绝缘子电气、机械性能综合优化[J]. 高电压技术，2019，45(12)：3844-3853.
JIA Yunfei, GAO Lu, JI Shengchang, et al. Comprehensive optimization of electrical and mechanical performance of 1 100 kV basin-type insulator based on genetic algorithm and finite element simulation[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3844-3853.

[46] 吴泽华，田汇冬，靳守锋，等. 252kV 紧凑型气体绝缘金属封闭输电线路三相盆式绝缘子结构综合优化[J]. 西安交通大学学报，2020，54(12)：138-146.
WU Zehua, TIAN Huidong, JIN Shoufeng, et al. Comprehensive optimization for the structure of three-phase spacer in 252 kV compact gas insulated metal enclosed transmission line[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(12): 138-146.

[47] 郭子豪. 特高压 GIL 用绝缘子关键技术研究与结构优化[D]. 西安：西安交通大学，2019.
GUO Zihao. Key technology research and structural optimization of UHV GIL insulators[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2019.

[48] 彭宗仁，郭子豪，田汇冬，等. 一种用于超/特高压管廊输电 GIL 中的基础单元及管廊输电 GIL：108963928B[P]. 2021-04-20.
PENG Zongren, GUO Zihao, TIAN Huidong, et al. A basic unit and pipe gallery transmission GIL for ultra / ultra high voltage pipe gallery transmission GIL: 108963928B[P]. 2021-04-20.

[49] 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 Yanan, 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.

[50] WU Z H, LI Z K, LIU P, et al. Simulation and analysis on motion behavior of metal particles in AC GIL[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(2): 567-574.

[51] 王　健，陈　超，李庆民，等. 基于热力耦合分析的 GIL 热致伸缩特性及其影响因素[J]. 高电压技术，2017，43(2)：429-437.
WANG Jian, CHEN Chao, LI Qingming, et al. Thermal-induced flexible property of gas insulated lines and influencing factors based on thermal mechanical coupling analysis[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 429-437.

[52] 陈　超. GIL 输电管道热致伸缩与机械振动特性研究[D]. 北京：华北电力大学，2016.
CHEN Chao. Research on the thermal-induced flexible property and mechanical vibration characteristics of gas-insulated transmission lines[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2016.

[53] 靳守锋，田汇冬，王浩然，等. 特高压 GIL 电接触结构选型及磨损特性研究[J]. 电网技术，2022，46(11)：4482-4490.
JIN Shoufeng, TIAN Huidong, WANG Haoran, et al. Comparison Between UHV GIL electrical contact structure schemes and analysis of their wearing characteristics[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4482-4490.

[54] 丁登伟，韩先才，王宁华，等. 特高压 GIL 绝缘击穿时暂态电压时频特征分析[J]. 电网技术，2020，44(6)：2393-2400.
DING Dengwei, HAN Xiancai, WANG Ninghua, et al. Time and frequency domain characteristics of transient voltage excited by insulation breakdown in UHV GIL[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2393-2400.

[55] 丁登伟，韩先才，张鹏飞，等. 基于暂态电压监测的特高压 GIL 故障定位方法及工程应用[J]. 高电压技术，2021，47(3)：1092-1099.
DING Dengwei, HAN Xiancai, ZHANG Pengfei, et al. Fault location method and engineering application in UHV GIL based on transient voltage monitoring[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 1092-1099.

[56] LI X, LIU W D, XU Y, et al. Surface charge accumulation and pre-flashover characteristics induced by metal particles on the insulator surfaces of 1100 kV GILs under AC voltage[J]. High Voltage, 2020, 5(2): 134-142.



彭宗仁
1953—，男，教授，博导
主要从事特高压交/直流套管关键技术、高压交/直流 GIS/GIL 关键技术、国产化环氧复合材料等方面的研究工作
E-mail: zrpeng@xjtu.edu.cn

PENG Zongren
Professor



刘　鹏(通信作者)
1979—，男，博士，教授，博导
主要从事电力设备结构优化设计、交/直流 GIS/GIL 电气和机械性能、聚合物放电特性和空间电荷特性研究
E-mail: pengliu@mail.xjtu.edu.cn

LIU Peng
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2022-07-15　修回日期　2022-11-15　　编辑　曹昭君