第 52 卷 第 5 期：2052-2067 高电压技术 Vol.52, No.5: 2052-2067
2026 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250476

GIS 绝缘子固化特征与缺陷产生机理研究进展

张滢滢，郝艳捧，米鸿儒，申子魁，周欣蕊，范浩东
（华南理工大学电力学院，广州 510640）

摘　要：残余应力、微小气泡和裂纹等绝缘缺陷是近 40 年来导致气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated metal enclosed switchgear and controlgear, GIS)绝缘子故障的重要因素之一。GIS 绝缘子固化过程中环氧复合材料和金属-环氧界面残余应力、气泡产生和裂纹扩展等机理尚未掌握，其技术瓶颈是缺乏有效的检测手段。该文分析研究了 GIS 绝缘子固化特征与缺陷产生机理：1）GIS 绝缘子环氧复合材料固化特征与缺陷产生机理；2）GIS 绝缘子金属-环氧界面固化特征与缺陷产生机理；3）GIS 绝缘子缺陷检测方法。其中，环氧复合材料固化特征包括凝胶化时间、凝胶化温度、玻璃化转变温度、固化度和残余应力/应变等；环氧复合材料缺陷产生机理研究包括化学-热-固化应变多物理场耦合模型、气泡活动机理和裂纹扩展相场模型等；金属-环氧界面气隙缺陷产生机理包括固化过程应力集中等；材料和界面缺陷抑制的工艺、配方改进方法包括固化温度/时间、填料、型号、配比和界面处理工艺等；绝缘子缺陷检测技术包括 X 射线探伤、脉冲电流法、特高频法和超声无损检测等；环氧固化特征检测包括差示扫描量热分析和光纤光栅技术等。该文最后指出光纤光栅技术通过监测环氧复合材料多个固化特征，不仅为 GIS 高性能绝缘子提供数字化监造技术，也为化学-热-固化应变多物理场耦合、气泡活动、裂纹扩展等提供揭示过程机理的试验技术。

关键词：凝胶化；玻璃化；固化度；残余应力/应变；气泡/气隙；裂纹

Progress on Curing Characteristics and Defect Generation Mechanism of GIS Insulators

ZHANG Yingying, HAO Yanpeng, MI Hongru, SHEN Zikui, ZHOU Xinrui, FAN Haodong
(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Insulation defects such as residual stress, tiny bubbles and cracks are one of the important factors leading to the failure of gas insulated metal enclosed switchgear (GIS) insulators over the past 40 years. The mechanism of residual stress, bubble generation and crack propagation of epoxy composites and metal-epoxy interface during the curing process of GIS insulators has not been mastered. Its technical bottleneck is the lack of effective detection methods. In this paper, the curing characteristics and defect generation mechanism of GIS insulator are analyzed and studied as follows: the first is the curing characteristics and defect generation mechanism of epoxy composites for GIS insulator; the second is the curing characteristics and defect generation mechanism of metal-epoxy interface for GIS insulator; the third is the defect detection method of GIS insulator. Among them, the curing characteristics of epoxy composites include gel time, gel temperature, glass transition temperature, curing degree, and residual stress/strain. The research on the defect generation mechanism of epoxy composites includes the multi-physical field coupling model of chemical-thermal-curing strain, bubble activity mechanism, and crack propagation phase field model. The generation mechanism of air gap defects at the metal-epoxy interface includes stress concentration during the curing process. The process and formula improvement methods of material and interface defect inhibition include curing temperature/time, filler, model, ratio, and interface treatment process. The defect detection of insulators include X-ray test, pulse current method, ultra-high frequency method, and ultrasonic nondestructive technology. The detection of epoxy curing characteristics includes differential scanning calorimetry and fiber Bragg grating technology. Finally, it is pointed out that the fiber Bragg grating technology can be adopted to not only provide digital monitoring and manufacturing technology for GIS high-performance insulators by monitoring multiple curing characteristics of epoxy composites, but also provide experimental technology for revealing process mechanisms such as chemical-thermal-curing strain multi-physics field coupling, bubble activity, and crack propagation.

Key words: gelation; vitrification; curing degree; residual stress/strain; bubble/air gap; crack

0 引言

随着全球清洁能源和低碳发展需求日益增强，电力行业作为碳排放的主要来源之一，其转型升级已成为实现“双碳”目标的关键环节[1]。气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated metal enclosed switchgear and controlgear, GIS)具有可靠性高、易维护等特点，在保障新能源发电稳定并网和高效传输等方面能发挥重要作用，为风能、太阳能等清洁能源的大规模开发利用能提供有力的技术支撑[2]。GIS 具有自动化等先进技术特征，具备远程监控、故障诊断和自动恢复等潜在功能，方便与智能电网无缝对接。GIS 能够有效适应复杂电网结构、高电压等级和多变运行环境等挑战，在新能源接入、特高压输电、智能电网建设等领域具有广泛的应用前景。

GIS 具有占地面积小、可靠性高等优势，在高压电网中的占比持续提升，尤其是在新建变电站和改造项目中广泛应用[3]。据某区域电网统计，近三年全网 110 kV 及以上 GIS 年均增长率为 5%；其中，全网 500 kV 及以上 GIS 年均增长率分别为 12%。

随着 GIS 投运量增大，设备故障时有发生。从近 40 年运行经验来看，绝缘故障始终是 GIS 可靠性的重要影响因素之一。

国际大电网会议(CIGRE)于 1996 年向世界范围的用户作了调查，并在 1998 年大会上做了“GIS 运行经验调查报告”，同年 CIGRE33/23-12 工作组在《Electra》刊物第 176 期上公布了调查结果：所调查设备的故障率均超过了《IEC60071-2 Insulation Co-ordination Part 2:Application Guide》对 GIS 绝缘所要求的指标 0.1 次/百间隔年，且 GIS 故障率随电压等级的提升而增加；主要原因分别是绝缘故障 57.3%、机械故障 18.1%和气体泄漏故障 12.4%[4]。由绝缘导致的故障率最高。

根据 2015 年“国家电网公司开关设备运行情况及近十年 GIS 故障专题分析”公布的 2013 年至 2015 年三年间全国 26 个省区市的数据统计，交流 330 kV 及以上各类变电设备引起的故障跳闸事故中，GIS 绝缘故障占比分别达到 17.6%、35.7%和 45.0%。《中国南方电网 2017 年度高压开关设备运行情况分析》公布的 2010—2017 年 79 起故障中有绝缘故障 44 起，占比 55.70%[4]。

绝缘故障在 GIS 故障类型中普遍存在，每年均有数起发生。某地区电网近十年由绝缘子引发的故障约占 GIS 总故障率的 16%[5]。GIS 面临着严峻的绝缘故障威胁。经设备拆卸检查、模拟计算和故障追溯分析，发现 GIS 故障主要由绝缘子的裂纹[6]、气泡[7]或金属-环氧界面缺陷[8]引起。

绝缘子是 GIS 关键元件，起电气绝缘、机械支撑和隔离气室等作用，通常由双酚 A 型环氧树脂、酸酐类固化剂、Al_2O_3 填料等浇注固化而成[9]。GIS 绝缘子生产浇注中环氧复合材料固化收缩会产生残余应力[10]，甚至气泡[11]、裂纹[12]、界面黏合不良[13]和填料沉降[14]等缺陷，运输、安装和长期运行过程中缺陷产生和发展，降低 GIS 绝缘子机械性能和绝缘性能，继而引发设备漏气、局部放电、击穿或炸裂等故障，严重影响电网安全稳定运行。

已有研究指出，金属-环氧界面是绝缘子机械性能[15]和绝缘性能[16]的薄弱区域，易产生缺陷，缺陷又会进一步降低其机械性能和绝缘性能。现行标准要求的型式试验、出厂试验时间短，由微小缺陷引发的局部放电微弱，导致绝缘子内部微小缺陷无法被完全发现；绝缘子内部应力只有累积到形成裂纹并发展到一定程度时才能被发现，此时绝缘子需要被更换；或者在例行检查中没有及时发现裂纹，随后可能发生绝缘故障，如此会带来巨大的经济损失。研究绝缘子材料、界面的残余应力并采取降低措施，研究缺陷产生机理并避免缺陷对 GIS 可靠运行非常重要。

1 GIS 绝缘子环氧复合材料固化特征与缺陷产生机理

1.1 环氧复合材料固化特征

环氧树脂(epoxy resin, EP)是一个分子中包含两个以上环氧基，在适当的化学试剂下能形成三维交联网络状固化物的化合物总称[17]，其固化制品具有良好的机械性能、电绝缘性能和较好的热、化学稳定性等，广泛用于电力设备绝缘和电子器件封装等领域[18]。环氧树脂和固化剂交联反应放热，固化过程中历经“胶液-凝胶化-玻璃化-三维交联结构固化物”，常用固化度反映其进程[19]。

环氧复合材料的固化特征主要包括凝胶化温度、凝胶化时间、玻璃化转变温度、固化度和残余应力/应变。凝胶化和玻璃化与材料的固化度和残余应力/应变密切相关，分别反映材料从液体到橡胶状态和从液体或橡胶到玻璃状态的临界转变，标志着材料机械模量的显著变化[20]。

1.1.1 凝胶化

凝胶化后的固化收缩通常被称为有效固化收缩[21]。固化初期凝胶化前环氧处于流动状态，缺乏任何机械模量，固化收缩不会引起任何应力。凝胶化后，环氧处于橡胶状态，不流动，气泡运动受到抑制[22]，材料也开始产生显著模量，边界约束会导致固化过程中应力产生和潜在缺陷形成[23]。

1.1.2 玻璃化和固化度

玻璃化转变温度 T_g 可以作为固化反应终止的标志，与固化度一一对应[24]。T_g 决定了焓、黏弹性、膨胀等显著变化的温度边界[25]。T_g 不仅影响环氧复合材料基本物理性能和加工性能，还直接关系到应用效果和可靠性。温度超过 T_g 时，材料分子运动加剧，可能导致物理性能和化学稳定性下降，例如，变软等。

1.1.3 残余应力/应变

环氧固化收缩主要受化学收缩、热膨胀/收缩和脱模共同影响，引发残余应力/应变，见图 1[26]。环氧树脂和固化剂的交联反应会使原先以范德华力作用的单体分子变成化学键连接，化学键键长比范德华力作用范围小得多，引起材料的化学收缩[27]。固化过程交联反应产生的温度变化会引起热应变，导致材料热膨胀或收缩[28]。固化过程模具对材料的约束力会导致材料体积收缩[29]。凝胶化后的固化收缩是固化残余应力/应变产生的主要来源。

残余应力发展在环氧固化过程中经历不同阶段，具体取决于材料的机械模量演变。在凝胶化前，应力可以忽略不计，因为液体单体和低聚物流动可以迅速适应收缩。凝胶化时，刚性网络形成，收缩受到约束时会产生应力。从凝胶化到玻璃化，模量较低，会导致低应力。玻璃化时，模量变高，应力松弛变慢。玻璃化后，应力随固化度单调发展[30]。

1.2 环氧复合材料缺陷产生机理

1.2.1 残余应力

温度场和固化度场不均匀是材料残余应力产生的重要机制[31]。2019 年，合肥工业大学用电测法试验分析比较酸酐固化环氧树脂材料不同部位的残余应力差异，发现样品内部越接近固化物中心，残余应力越大；冷却介质热导率越高，降温速度越快，残余应力越大[32]。2020 年，清华大学研究脂环族环氧树脂固化特性与复合绝缘子内部温度场分布，指出伞裙根部倒角处温度分布梯度最大，很容易出现固化收缩不一致，从而产生过大的残余应力[33]。

化学-热-固化应变多物理场耦合模型用于研究环氧复合材料固化过程中温度分布、残余应力/应变分布等，包括固化动力学模型、热-化学模型和固化形变模型。环氧树脂的固化反应较为复杂，涉及许多传质和传热过程。固化过程中温度变化是由热源引起的，与环氧树脂的固化度有关。各模型之间的耦合关系，见图 2[34]。

文献[34]指出固化动力学模型可以定量描述环氧树脂内部的交联过程。热传导模型用于计算环氧树脂的温度分布和变化。通过传输固化度和温度分布的数据实现固化度与温度之间的双向耦合。基于上述两种模型得到的固化度和温度数据，通过热-力耦合建立固化变形模型，求解环氧固化残余应力/应变。

1）固化动力学模型：环氧树脂固化过程中的放热行为与官能团类型、数量有关，固化反应过程复杂。非等温差示扫描量热分析法(differential scanning calorimetry, DSC)常被用于研究环氧树脂固化动力学，可以记录整个反应过程中热量随温度或时间的变化，根据式(1)和(2)可以计算固化度 α 和固化速率 $\mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}t$[34]。这些数据将用作拟合固化动力学模型。

$$\alpha=\frac{\sum_{t=1}^{N_t}H(t)}{\sum_{t=1}^{N}H(t)} \tag{1}$$

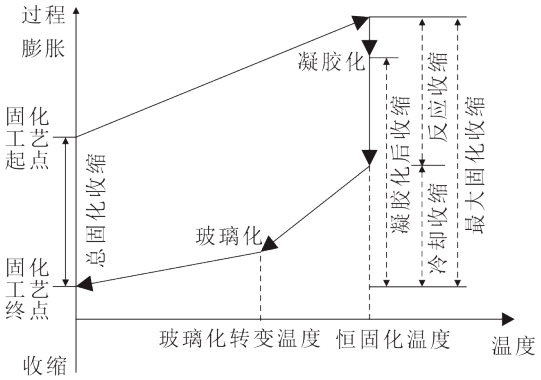


图 1 环氧固化过程中的膨胀与收缩

Fig.1 Expansion and shrinkage of epoxy during curing

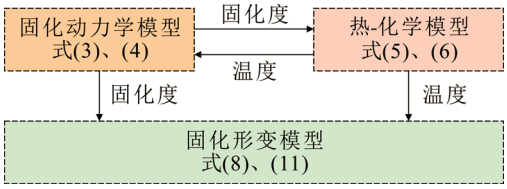


图 2 化学-热-固化应变耦合关系

Fig.2 Coupling relationship of chemical-thermal-curing strain

$$\frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}\Delta H(t)/\mathrm{d}t}{H_\mathrm{a}} \tag{2}$$

式中：$H(t)$为某时刻 t(t=1, …, N_t, …, N)的放热量；$\Delta H(t)$为累积放热量；H_a 为总放热量，可以由 DSC 曲线积分得到。

固化动力学的研究方法可分为宏观唯象模型和微观机制模型两大类。较微观机制模型，唯象模型基于经验或半经验速率方程，关注反应的整体过程，避免了化学反应的细节，计算量较小，应用广泛。GIS 绝缘子用环氧复合材料的固化动力学研究通常用宏观唯象模型，其实际固化过程符合 SB(m,n)自催化模型[35]，见式(3)。

$$\frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}t}=K(T)\alpha^m(1-\alpha)^n \tag{3}$$

式中：α 为固化度；m 和 n 为模型的反应级数；反应速率常数 $K(T)$可写成活化能 ΔE_a、温度 T、反应模型频率因子 A 和普适气体常量 R(8.314 J/(mol·K))的函数，即：

$$K(T)=A\mathrm{e}^{\frac{-\Delta E_\mathrm{a}}{RT}} \tag{4}$$

2）热-化学模型：固化过程中温度分布本质上是一个具有内部热源的非线性热传导问题，内部热源是由环氧树脂固化反应放热产生的。这种宏观动态特征通常可用式(5)傅立叶热传导定律来表征[34]。

$$\rho C_\mathrm{p}\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}=K_\mathrm{T}\left(\frac{\mathrm{d}^2T}{\mathrm{d}x^2}+\frac{\mathrm{d}^2T}{\mathrm{d}y^2}+\frac{\mathrm{d}^2T}{\mathrm{d}z^2}\right)+Q \tag{5}$$

式中：ρ 为密度；C_p 和 K_T 分别为恒压热容和导热系数；Q 为单位体积内材料放热速率，与密度、反应放热量 H_t 和固化度有关，即：

$$Q=\rho H_\mathrm{t}\frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

求解式(5)的边界条件见式(7)。本研究模具涂有脱模剂，可将环氧树脂固化过程视为无外力约束。因此，将外边界设置为热通量。

$$q_0=h(T_\mathrm{e}-T) \tag{7}$$

式中：q_0 为热量；h 为换热系数，设为 10 W/(m^2·K)；T_e 为外部环境的绝对温度。

3）固化变形模型：环氧树脂固化过程的总形变 ε_i 如式(8)所示[34]。

$$\varepsilon_\mathrm{i}=\varepsilon_\mathrm{m}+\varepsilon_\mathrm{t}+\varepsilon_\mathrm{c} \tag{8}$$

式中：ε_m 由外力引起，主要表现为脱模前模具对材料的束缚力，脱模后该应变作用将会逐渐消失；ε_t 为热应变，是由温度变化导致的膨胀/收缩；ε_c 为化学反应产生的固化变形。

热应变是热膨胀系数 C_T 与温度的函数：

$$\varepsilon_\mathrm{t}=C_\mathrm{T}(T)(T-T_\mathrm{r}) \tag{9}$$

式中：T_r 为参考温度。

由化学反应产生的收缩应变可由体积变化率得到，体积变化率与固化度有关，见式(10)。

$$\varepsilon_\mathrm{c}(\alpha)=1-\sqrt[3]{1-V_\mathrm{c}(\alpha-\alpha_\mathrm{g})} \tag{10}$$

式中：ε_c 为化学收缩应变；α_g 为环氧凝胶化的固化度；体积收缩 V_c 为−0.02。

用线弹性本构模型预测环氧树脂的固化残余应力，见式(11)。环氧的弹性模量可以用固化程度线性表示，BOGETTI T.A.和 GILLESPIE J.W.推导了 CHILE(α)模型，见式(12)[15]。

$$\boldsymbol{\sigma}=\boldsymbol{E}\left(\boldsymbol{\varepsilon}-\boldsymbol{\varepsilon}_\mathbf{0}\right)+\boldsymbol{\sigma}_\mathbf{0} \tag{11}$$

$$E(\alpha)=\begin{cases}E_0,\alpha<\alpha_\mathrm{g}\\ \left(1-\dfrac{\alpha-\alpha_\mathrm{g}}{1-\alpha_\mathrm{g}}\right)E_0+\dfrac{\alpha-\alpha_\mathrm{g}}{1-\alpha_\mathrm{g}}E_1,\alpha\ge\alpha_\mathrm{g}\end{cases} \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{\sigma}$、$\boldsymbol{\sigma}_0$ 为残余应力和初始应力；$\boldsymbol{\varepsilon}$、$\boldsymbol{\varepsilon}_0$ 为总应变和初始应变；$\boldsymbol{E}$ 为弹性模量的张量；E_0 为环氧未固化时的弹性模量；E_1 为完全固化时的弹性模量。

目前 GIS 绝缘子材料残余应力/应变分布研究已取得初步进展。绝缘子在固化过程中为直立状态，依照工程经验，下部的环氧树脂先固化，上部的环氧树脂由于重力的因素进行“补胶”，向下补充，这样固化的应变较小。在一定温度范围内，温度高的地方固化反应更快，这就需要环氧树脂在竖直方向上有一个温度梯度。2019 年，合肥工业大学用有限元计算分析了盆式绝缘子固化成型过程中温度场分布情况，指出盆式绝缘子在固化成型过程中竖直方向上具有良好的温度场分布，即温度分布从上往下呈现逐渐升高的梯度分布；但是绝缘子凹面和凸面温差较大，工艺上需要一定的改进[36]。绝缘子固化过程中由于“补胶”可能存在环氧材料内部分层。2024 年，西安理工大学研究了环氧树脂与预制环氧树脂棒界面的温度和应变，指出无界面处的界面固化峰值温度大于有界面处的固化峰值温度，环氧树脂内部应变小于界面处应变[37]。

1.2.2 气泡

目前有研究指出气泡缺陷是由于环氧中夹杂的气体或气泡产生，这是由于搅拌不当(如：环氧与固化剂混合时)、脱气或环氧流动过程中压力突然下降等[38]。

文献[39]阐述了复合材料固化过程中内部气泡

活动机理，包括气泡溃灭、逃逸及融合运动规律等。气泡一般由制备过程中对空气的机械夹杂和因受热析出挥发组分而形成的内部成核作用产生。形成后，因以下原因而生长(或缩小)：(1)气泡/树脂界面发生气体(基本是水蒸气)扩散。(2)气泡周围树脂内温度或压力的变化。两种因素相互联系且同时进行。气泡内成分是空气和树脂中的挥发组分(主要是水蒸气)，处于平衡态时，有式(13)成立[39]。

$$P_{\mathrm{v}} = P_{\mathrm{r}} + 4\delta/d \tag{13}$$

式中：P_{v}为气泡内压力，为气泡所含空气的压力与水蒸气的压力之和；P_{r}为气泡周围树脂内压力；d为气泡直径；δ为气泡与树脂基体的界面张力。

如果树脂内压力发生变化，例如压力减小，则$P_{\mathrm{v}}>P_{\mathrm{r}}+4\delta/d$，气泡因此而扩张，其内部空气和水蒸气的压力将变小，空气含量是恒定的，而水分则因水蒸气分压小于其饱和蒸汽压而从树脂中向气泡内扩散，这又进一步刺激气泡的扩张，最后在新的尺寸下，气泡再次达到平衡态。如果温度发生变化，纯水的饱和蒸汽压会改变，为达到新的水蒸气饱和分压必导致水分在界面处的扩散。另外，温度的变化也使气泡内气体压力发生变化，这又影响到气泡涨缩和水分扩散，最后气泡在新尺寸下重新达到平衡。水分在树脂中的扩散服从费克扩散定律[39]，即：

$$M = D\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}x} \tag{14}$$

式中：M为单位面积、单位时间扩散分子的摩尔数；$\mathrm{d}c/\mathrm{d}x$为树脂中水分的浓度梯度；D为扩散系数。

采用费克扩散定律，按质量守恒原则，推出气泡周围树脂内水分的扩散关系式如下：

$$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}t} = D\left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial c}{\partial r}\right) \tag{15}$$

式中：$\mathrm{d}c/\mathrm{d}t$为树脂内某处水分浓度随时间的变化率；r为以气泡中心为原点球坐标系中的径向坐标。固化操作开始前，水分均匀地分布在树脂内，初始浓度c_{i}已知；固化开始后，离气泡较远处的树脂内水分浓度仍为c_{i}，在气泡与树脂界面，水分的扩散处于瞬时动态平衡，即水分浓度为与气泡内水蒸气相饱和的浓度c_{m}，这是因为树脂内的扩散阻力是主要阻力。对确定的树脂固化体系，c_{m}由气泡内水蒸汽分压和温度决定，对于理想混合体系，应遵循拉乌尔定律或亨利定律，而含水分的树脂基体属于实际混合体系，需根据偏离理想行为的程度而做一定的修整，关联式形式[39]一般如下：

$$c_{\mathrm{m}} = b^{\phi p} \tag{16}$$

式中：Φ为气泡内的相对湿度；系数b和p因树脂体系的不同而不同。这样，关系式(15)的初始条件和边界条件为

初始条件：

$$\begin{cases} c = c_{\mathrm{i}} \\ r \geq d_{\mathrm{i}}/2 \\ t < 0 \end{cases} \tag{17}$$

边界条件：

$$\begin{cases} c = c_{\mathrm{m}}, r \geq d/2, t \geq 0 \\ c = c_{\mathrm{i}}, r \to \infty, t \geq 0 \end{cases} \tag{18}$$

式中：d_{i}为气泡初始直径；从操作开始到时刻t通过气泡/树脂界面扩散的水蒸气总量m_{T}为：

$$m_{\mathrm{T}} = -\int_0^t \pi d^2 D\frac{\partial c}{\partial r}\Big|_{r=d/2}\mathrm{d}t \tag{19}$$

这样，对初始直径和位置已知的气泡，可计算出其大小在固化过程中随时间的变化。

1.2.3 裂纹

环氧固化过程中裂纹等缺陷的产生与其固化特征密切相关，固化工艺和配方都是重要影响因素。2011 年，德国 M.Harsch 研究等温固化持续时间对环氧树脂应变和应力发展的影响，发现凝胶化和玻璃化严重影响其内部应力。环氧树脂凝胶化后能够传递力，低温和低交联度下发生玻璃化会产生高应力，导致环氧树脂表面呈现蜘蛛网状开裂[12]。2014 年，西安高压电器研究院等分析了固封极柱用环氧树脂固化物开裂问题的影响因素：产品的结构设计、环氧树脂的配方设计、压力注射工艺、固化工艺、注射模具的结构设计和调试过程等。探讨了环氧树脂注射料的开裂失效机理，由于内应力和缺陷的存在，在受到温度变化或者机械外力等条件冲击时，环氧树脂固化物内部形成的缺陷和微裂纹扩展导致开裂失效[40]。2024 年，西安理工大学等研究了不同固化剂用量下界面两侧环氧树脂之间存在的弱交联相互作用对应力以及两侧环氧树脂应变发展的影响，指出固化剂用量和交联程度对玻璃态后冷却阶段的应变有显著影响。固化剂含量为 85.7%时，界面应力最小；固化剂用量为 110%时，树脂收缩应变和界面结合力的共同作用导致界面处出现“撕裂”裂纹[37]。

环氧复合材料内部应力超过其内聚强度或黏接强度时，就会产生裂纹，甚至破坏。2025 年，华南理工大学开发了一种裂纹扩展相场模型评估环氧

树脂的断裂韧性并模拟其裂纹扩展行为，提出了一种改进的 logistic 函数模拟环氧树脂的脆性断裂，与试验结果一致[41]。

文献[41]描述了裂纹扩展相场模型：断裂相场方法引入连续相场，用以近似裂纹。相场值为 0 表示材料完好，1 则表示材料完全损坏，其中间值则代表材料的损伤程度，采用指数形式的相场函数 $\eta(x)$ 来描述弥散裂纹：

$$\eta(x)=\mathrm{e}^{\frac{-|x-x^*|}{l_0}} \tag{20}$$

式中：η 为相场变量；x 为一维位置坐标；x^*为裂纹位置坐标；l_0 为相场模型特征宽度，裂纹弥散宽度由相场特征宽度 l_0 决定，l_0 越大裂纹弥散宽度越宽，反之则越小。

式(20)中的指数函数是下面微分方程的解：

$$\eta(x)-{l_0}^2\eta''(x)=0 \tag{21}$$

方程(21)又是变分原理的欧拉方程：

$$\begin{cases}\eta=\mathrm{Arg}\left(\inf\limits_{\eta\in H} I(\eta)\right)\\ I(\eta)=\dfrac{1}{2}\int_{\Omega}\left(\eta^2+{l_0}^2\eta'^2\right)\mathrm{d}V\end{cases} \tag{22}$$

式中：$\mathrm{d}V=\Gamma\mathrm{d}x$；$\mathrm{d}V$ 为体积微元；H 为求解域；Γ 为裂纹面积；I 为泛函；Ω 为积分域体积。将式(20)中 $\mathrm{d}(x)$代入式(22)可得：

$$I(\eta=\mathrm{e}^{-|x-x^*|/l_0})=l_0\Gamma \tag{23}$$

式(23)将 I 与 Γ 联系起来，从而引入裂纹面泛函，如式(24)所示。将式(24)中被积分部分定义为裂纹面密度。

$$\Gamma_l(\eta)=\frac{1}{l_0}I(\eta)=\frac{1}{2l_0}\int_{\Omega}(\eta^2+{l_0}^2\eta'^2)\mathrm{d}V \tag{24}$$

裂纹扩展过程即系统总势能的耗散，用于形成新裂纹表面。其中总势能由弹性应变能 W_b、裂纹表面能 W_d、外部载荷势能 W_ext 所构成。

$$W=W_\mathrm{b}+W_\mathrm{d}-W_\mathrm{ext} \tag{25}$$

其中，W_b、W_d、W_ext 分别为：

$$W_\mathrm{b}=\int_{\Omega}\psi(\boldsymbol{\varepsilon})\mathrm{d}V \tag{26}$$

$$W_\mathrm{d}=G_\mathrm{c}\Gamma=\int_{\Omega}\Upsilon(\eta,\nabla\eta)\mathrm{d}V \tag{27}$$

$$W_\mathrm{ext}=\int_{\Omega}\boldsymbol{f}\boldsymbol{u}\mathrm{d}V+\int_{\partial\Omega}\boldsymbol{k}\boldsymbol{u}\mathrm{d}S \tag{28}$$

式中：G_c 为临界能量释放率；γ 为裂纹面密度；$\boldsymbol{f}$ 为体积力；$\boldsymbol{k}$ 为边界力；$\boldsymbol{u}$ 为位移量；$\mathrm{d}S$ 为面积微元；$\psi(\boldsymbol{\varepsilon})$为应变能密度函数。

根据 F-M 变分原理，由自由能泛函(总势能)最小化原则控制，势能泛函偏分应该为 0(平衡状态)。

$$\begin{aligned}\delta W=&\int_{\Omega}\left(\frac{G_\mathrm{c}}{l_0}\eta+w'(\eta)\cdot\frac{1}{2}\boldsymbol{\sigma}:\boldsymbol{\varepsilon}-G_\mathrm{c}l_0\Delta\eta\right)\delta\eta\mathrm{d}V+\\&\int_{\partial\Omega}\left(w(\eta)\boldsymbol{\sigma}\cdot\boldsymbol{n}-\boldsymbol{k}\right)\delta\boldsymbol{u}\mathrm{d}S-\int_{\Omega}\left(\nabla\left(w(\eta)\boldsymbol{\sigma}\right)+\boldsymbol{f}\right)\delta\boldsymbol{u}\mathrm{d}V+\\&\int_{\partial\Omega}G_\mathrm{c}l_0\nabla\eta\cdot\boldsymbol{n}\delta\eta\mathrm{d}S=0\end{aligned} \tag{29}$$

式中：$\boldsymbol{\sigma}$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为二阶张量；“:”为双点积；$\boldsymbol{n}$ 为边界的外法线方向单位向量；w 为损伤退化函数。

位移场和相场是相对独立的自变函数，可以推出位移场和相场的控制方程：

$$\nabla\cdot\boldsymbol{\sigma}+\boldsymbol{f}=0 \tag{30}$$

$$\psi(\boldsymbol{\varepsilon})+\frac{G_\mathrm{c}}{l_0}(\eta-{l_0}^2\Delta\eta)=0 \tag{31}$$

1.3 环氧复合材料缺陷抑制方法

GIS 绝缘子性能与其固化工艺和配方密切相关。高电压、大容量 GIS 要求绝缘子具有更高的机械强度、耐热性能和高可靠性，包括无缺陷、低残余应力和高韧性等。目前通常改进固化工艺和配方制备高性能绝缘子。

1.3.1 固化工艺

环氧复合材料性能在很大程度上取决于固化周期中使用的时间和温度[42]。若环氧固化过程太快，其体积收缩快、放热剧烈，会产生各类缺陷；若固化过程太慢会延误工期，耽误其他生产步骤。固化完成后，不同固化程度树脂的玻璃化转变温度也不一样。固化温度应低于玻璃化转变温度，玻璃化后自由体积的减少和聚合物链段的显著迁移率限制通常会使反应速率降低几个数量级[43]。固化温度通常用非等温 DSC 法制定。通常选择在比固化放热峰起始温度高 10~20 ℃且比峰值温度略低的温度下固化一段时间，然后在峰值温度和终止温度之间的温度下再固化一段时间，以确保固化完全和提高生产效率[44]。

保温温度/时间和冷却速率等也会影响环氧复合材料的物理性能和力学性能。1992 年，美国 S.R.WHITE 等测试了非对称交叉层合板的横向力学性能，研究了保温温度、保温时间、冷却速度、冷却压力和后固化对残余应力的影响，发现在较低温度下固化较长时间或在三步固化循环中使用中间低温驻留，残余应力可以减少 25%~30%，同时保持或增强横向机械性能[45]。同年，美国 Bogetti 和 Gillespie 研究了固化工艺(高压釜温度固化周期)、层压板厚度、环氧固化收缩率和层压板堆叠顺序对固化过程中厚

截面玻璃/聚酯和石墨/环氧树脂层压板诱导应力/应变演变影响，结果表明固化收缩产生的残余应力足以引发横向裂纹和分层；厚截面热固性层压板力学性能在很大程度上取决于固化工艺[31]。2001 年，加拿大 Chen 等利用三维黏弹性细观力学模型研究了玻璃纤维/环氧树脂交叉层压板中固化诱导残余应力演变的影响，研究表明冷却速率较高会导致层压板中残余应力较高；残余应力在层合板整个区域分布不均，自由边缘和内部区域的残余应力明显不同[46]。

固化工艺不当会降低环氧复合材料的物理性能和力学性能，引发材料开裂等问题。2002 年，日本 K.Ogi 用显微维氏硬度测试和傅里叶变换红外光谱研究了固化工艺对碳/环氧复合材料横向开裂影响。结果表明，固化工艺可以增加环氧硬度，但不改变其化学结构；而横向强度降低主要原因是碳纤维/环氧基体界面退化[47]。2011 年，德国 M.Harsch 等研究了固化工艺对环氧固化过程法向应变和法向应力影响，指出凝胶化和玻璃化影响固化诱导的应变和应力；玻璃化时如果环氧固化度低会产生高内应力，导致环氧早期开裂；热膨胀可以补偿固化引起的体积收缩，减少内应力积累[48]。

优化固化工艺可以降低环氧复合材料残余应力，提升其物理性能和力学性能。2000 年，美国 J.D.Russell 等用体积膨胀法、差示扫描量热法、介电固化监测和单纤维压力测试方法研究并修改了 3501-6 环氧树脂的固化工艺。结果表明固化工艺影响了纤维/基质界面的固化程度以及固化收缩率。固化度越高，应力松弛时间越长；固化收缩率越小，纤维应力越小[49]。

GIS 绝缘子常见制造工艺有恒温固化、两段固化和三段固化，通常设置较长固化时间，确保环氧复合材料完全固化。环氧复合材料在不同工艺下发生固化反应，会形成不同的固化物交联结构，性能也大不相同。2017 年，苏州巨峰公司和中国电科院通过等温和非等温 DSC 研究 GIS 绝缘子环氧复合体系固化动力学，制定了三段、两段固化工艺并测试了固化物性能；在三段固化工艺基础上，优化两段固化工艺，研究了 Al_2O_3 填料含量的影响，通过固化物综合性能表征，最终提出了效能比更好的固化工艺[50]。2024 年，平高集团有限公司用非等温 DSC 研究了环氧浇注绝缘子的快速固化工艺，并制备了 252 kV 盆式绝缘子，测试其雷电冲击、工频耐受、局放测试、水压测试等结果均满足技术要求，该工艺与恒温固化工艺相比，固化时间缩短 10 h，生产效率提升了 59.4%[51]。

1.3.2 配方

改进配方(包括填料、型号、配比等)是改善环氧复合材料性能的重要方法。微、纳米级 Al_2O_3 和 SiO_2 颗粒是 GIS 绝缘子环氧复合材料最常用的填料。其中，α-Al_2O_3 作为一种机械强度高、化学稳定性强的优质材料[52]，在特高压绝缘应用中具备优势。

填料的含量、粒径和形貌等影响环氧复合材料的物理性能和力学性能。2016 年，多相复杂系统国家重点实验室研究了不同粒径、形貌 α-Al_2O_3 对环氧复合材料介电性能、热学性能的影响，研究表明：多尺度无规则 α-Al_2O_3 提升了 α-Al_2O_3/环氧复合材料玻璃化转变温度，材料耐电击穿性能、耐电蚀性能也有所提升，但其削弱了其导热能力。粒径 2 μm 球形 α-Al_2O_3 与粒径 12 μm 无规则 α-Al_2O_3 混合后，提高了材料热导率，但是降低了材料耐击穿性能及玻璃化转变温度[53]。2024 年，华南理工大学等研究了 α-Al_2O_3 填料含量对环氧树脂常温固化收缩的影响，发现该填料会延长环氧凝胶化时间，降低固化放热峰值温度；Al_2O_3 质量分数超过 44.44%时，环氧占比少及填料导热使升温阶段环氧固化收缩主要受化学收缩影响。质量分数 70.59%Al_2O_3 环氧的玻璃化转变温度最大，残余应变处于较低水平，分别为 121 ℃和−774.01×10^{-6}[54]。

优化配方可以提升环氧复合材料的物理性能和力学性能。2014 年，平高集团技术中心等在常规浇注配方基础上添加一定比例的脂环族环氧树脂，同时采用三段固化工艺制造了高性能盆式绝缘子，并测试了其电气性能、耐热性能、力学性能及热电老化性能，结果表明：与常规配方相比，新配方盆式绝缘子电气强度提高了 27.6%，热变形温度提高了 20.2%，热电老化寿命达到 40 年以上，通过了工频和雷电冲击裕度试验，水压破坏强度达到 4.6 MPa[55]。2020 年，上海某公司研究了 GIS 盆式绝缘子浇注材料配方体系，指出固化剂用量对环氧材料的高玻璃化转变温度、力学强度影响较大，对电性能的影响较小，须严格控制固化剂与环氧树脂的配比[56]。2024 年，华南理工大学对比了 GIS 绝缘子用进口与国产混料 5531:E-39D(1:1)/5533、国产材料 E-39D/N570 和进口材料 5531/5533 的断裂韧性，见图 3，试验结果表明 5531:E-39D(1:1)/5533 断裂韧性更好，材料抵抗裂纹扩展的能力最强[57]。

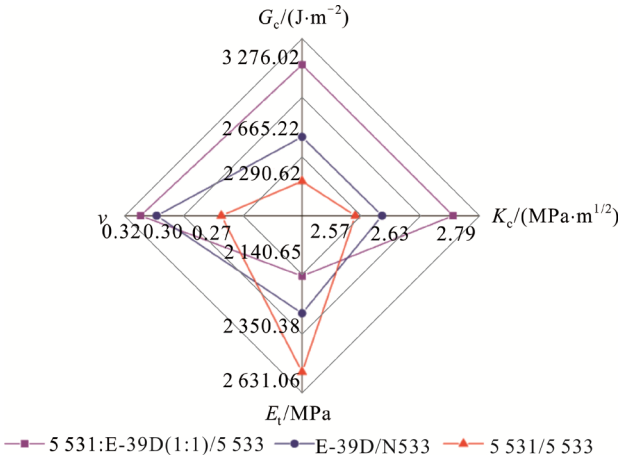


图 3　3 组环氧复合材料弹性模量 E_t、泊松比 υ 和断裂韧性量化指标(K_c 和 G_c)的对比[57]

Fig.3　Comparison of elastic modulus, Poisson's ratio, and fracture toughness for three groups of epoxy composites

综上所述，环氧复合材料固化收缩会产生残余应力/应变或缺陷，残余应力/应变或缺陷与其他固化特征(凝胶化、玻璃化和固化度等)密切相关。目前通过改进环氧复合材料固化工艺(温度和时间等)和配方(Al_2O_3 填料和环氧型号等)降低残余应力和缺陷等已取得初步研究进展。

2　GIS 绝缘子金属-环氧界面固化特征与缺陷产生机理

2.1　金属-环氧界面缺陷产生机理

环氧固化收缩会引发金属-环氧界面分层或开裂失效[58]。2011 年，日本 F.Ohsako 等建立了 $Al(OH)_3$/双酚 A 二缩水甘油醚的团簇模型，发现氢键相互作用是铝-环氧界面黏附的主要原因[59]。2013 年，美国 S.Yang 等用分子动力学模拟研究了铜-环氧界面的变形或破坏行为，发现表面未经处理的铜不会与环氧树脂形成化学键，只有弱范德华力和氢键，导致界面黏结性能较差，容易分层[60]。同年，德国 H.Munkert 等用原子力学显微镜和 X 射线电子能谱探讨了不锈钢(316 L)与环氧树脂界面的黏附机理，发现环氧树脂与钢之间的化学相互作用会使 Fe^{3+}还原为 Fe^{2+}[61]。2019 年和 2022 年，天津大学研究了盆式绝缘子固化过程中 Al_2O_3 填料沉降和 GIS 水平铺设时绝缘子应力分布，发现绝缘子底部边缘和金属-环氧上界面密度最大；第一主应力集中在金属-环氧上界面，是绝缘子机械损坏的主要威胁；水平铺设时绝缘子浇注口朝下可以提高其机械可靠性[62]。基于粒径分析和 Stokes 定律，建立了环氧复合材料填料沉降模型和三支柱绝缘子动态断裂仿真模型，比较了铺设方向对绝缘子动态断裂性能的影响以及浇注方向对密度均匀性的影响，结果表明径向载荷下绝缘子断裂首先出现在上支柱金属-环氧界面处，并迅速横向扩散；绝缘子安装时浇口在上方比下方要好[14]。

金属-环氧界面应力集中会引发界面气隙缺陷。2019 年，西安交通大学等研究特高压盆式绝缘子铝-环氧界面失效形态发现，界面处应力集中，这可能引发界面分离产生气隙缺陷[63]。2021 年，华南理工大学等试验和仿真研究发现三支柱绝缘子铝-环氧界面曲率最大处应力最大，该处环氧容易产生裂纹，引发柱腿脆性断裂。提出了绝缘子机械失效过程界面仿真的粘附和剥离模型，发现脆性断裂前界面仿真适合黏附模型，断裂过程适合剥离模型；径向载荷下绝缘子破坏取决于界面曲率最大处环氧拉伸强度，轴向载荷下破坏取决于界面剪切强度[64-65]。2022 年和 2024 年，西安理工大学等用光纤光栅试验研究了环氧固化过程中同轴圆柱体铝-环氧界面应变/应力的形成和分布，发现界面残余应变主要产生于冷却阶段；仿真了固化后界面含气隙缺陷的应力分布，结果表明界面中心第一主应力由中心向边缘逐渐增大，上边缘和下边缘分别达到 41.06 和 40.20 MPa，且此缺陷会增加界面最大场强[66]。2024 年，华北电力大学等研究了支柱绝缘子金属-环氧界面气隙缺陷演化与炸裂过程。基于实验研究结果将支柱绝缘子炸裂过程分为 3 个特征阶段：裂纹产生与扩展阶段、断裂阶段、炸裂阶段；还构建了电-机械耦合作用下裂纹扩展相场仿真模型，分析了支柱绝缘子不同炸裂阶段的主导机制：在裂纹产生与扩展阶段，电势能起主要作用；在断裂阶段，电势能作用逐渐减弱，机械势能逐渐增大并起主导作用，当机械势能达到材料应力临界点时，绝缘子发生脆性炸裂[67]。这为界面缺陷阈值和界面分层的气隙缺陷临界应力条件提供了理论支撑和技术手段。

国内外学者研究了固化过程中金属-环氧界面应力产生机理。2019 年，日本 K.Abiko 等用拉曼显微光谱法分析了 100 ℃固化铝-环氧界面残余应力分布，发现铝-环氧界面处应力集中，铝和环氧树脂的力学性能和热膨胀系数差异是影响残余应力分布的主要因素[68]。2022 年，西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室等通过有限元方法建立了温

度-固化-应力多物理场耦合模型，计算了绝缘子固化过程中产生的应力，指出固化过程中，各个时间点的应力分布趋势基本一致，并且应力主要集中于中心嵌件和屏蔽环附近，冷却后最大应力值达到34.1 MPa；绝缘子固化产生的应力主要来源于固化阶段化学收缩和降温阶段冷缩效应产生的变形倾向被限制约束[69]。

2.2 金属-环氧界面缺陷抑制方法

GIS 绝缘子界面处理主要包括金属表面处理工艺和界面剂工艺。铝-环氧树脂界面黏结效果很大程度上决定了绝缘子整体耐压强度及机械强度。该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。2016 年，日本 M.Matsushima 等研究了氧化和硅烷偶联剂处理铜、铝和银对金属-环氧界面黏接强度和热性能的影响。试验结果表明铜表面氧化处理 200 h，剪切强度从 33.9 MPa 提高到 42.3 MPa；铝氧化处理 1 h，剪切强度最大；而银表面氧化处理不能提高剪切强度。硅烷偶联剂处理可以提高铜、铝和银表面的接触角，提高铜和铝的剪切强度，不影响初始热阻，但可以更有效地抑制了循环弯曲加载后热阻的增加和界面的分层[70]。

界面处理材料通常分为环氧类和橡胶类，橡胶类配方应力缓冲能力更强，而黏接能力相对较弱。环氧类配方黏接能力强，而缓冲能力较弱[71]。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，另一方面期望界面发生剥离时，界面剂能够黏附在环氧复合材料一侧，屏蔽气隙电场[72]。

2020 年，西安理工大学等建立了含半导电胶涂层盆式绝缘子模型，推导出涂层两侧场强与涂覆材料参数的关系，得到不同涂覆材料涂层两侧场强分布，结果表明涂层厚度、相对介电常数以及电导率是影响涂层两侧场强的主要因素；涂层厚度与缺陷高度相当，且相对介电常数>100 时，涂层可以较好地屏蔽铝嵌件表面缺陷[73]。2023 年，西安交通大学等结合固化动力学-热-力耦合仿真研究盆式绝缘子材料工艺，结果表明，涂覆半导电胶材料可屏蔽金属-环氧黏接界面凸起、凹陷等缺陷；开发了以环氧为基体，丁腈橡胶为增韧剂，填充炭黑的半导电胶材料；界面涂敷后浇注成型的盆式绝缘子水压破坏值达 3.65 MPa，高于原有界面材料时 3.1 MPa，远高于不使用界面材料时 2.0 MPa[72]。2024 年，西安交通大学等研制绝缘子铝-环氧界面用环氧树脂/炭黑半导电胶材料，半导电胶材料电阻率随着炭黑含量增加先降低后趋于稳定，有效抑制了空间电荷向环氧绝缘材料的注入，刷涂一层半导电胶使环氧复合绝缘材料平均电荷密度降低 35%以上[74]。

综上所述，环氧固化收缩产生的残余应力/应变等存在引发金属与环氧界面分层或开裂失效等风险。尤其是 GIS 绝缘子铝-环氧界面薄弱，应力集中且易产生缺陷，这会引发绝缘子局部放电[75]或击穿等故障[76]。尽管界面工艺可以调控其性能，但加工难度较大，金属-环氧界面结构也更加复杂。目前模型简化局限，考虑填料沉降等实际工艺扰动的研究尚少；金属-环氧界面缺陷阈值和界面分层的气隙缺陷临界应力条件仍未明确；界面固化特征与缺陷产生机理仍有待深入研究。

3 GIS 绝缘子缺陷检测方法

3.1 GIS 绝缘子缺陷检测

GIS 绝缘子缺陷检测主要包括两个方面，一是型式试验和出厂试验检测 GIS 绝缘子缺陷(即质量控制阶段)，包括 X 射线探伤和脉冲电流法局部放电检测。目前试验用 X 射线数字成像技术，能使内部缺陷可视化，但对尺寸较小、位置复杂的缺陷分辨率低[77]。脉冲电流法通过测量试品局部放电脉冲电流，获得视在放电量、放电相位和放电频次等信息，数据具有可比性，是目前唯一有国际标准的局部放电检测方法。2000 年，IEC 公布了局部放电测量标准 IEC-60270；2003 年，我国形成了 GB/T 7354 标准，规定额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备在其局部放电试验电压下最大允许的局部放电量不超过 3 pC。然而，脉冲电流法易受电磁环境干扰和试品电容影响。GIS 运行环境复杂，接地线容易耦合周围空间的多种电磁波，形成干扰影响脉冲电流的测量。当被试品电容较大时，随着试品电容增加脉冲电流法的灵敏度会下降[78]。二是 GIS 绝缘子状态检测(即运行维护阶段)，主要包括特高频法(ultra high frequency，UHF)局部放电在线监测和绝缘子内部缺陷超声法。

由于抗干扰性能良好，UHF 广泛应用于运行设备局部放电在线监测与定位。UHF 检测 GIS 绝缘子缺陷不能可视化，对微裂纹放电检测灵敏度较低。绝缘介质中每次局部放电均会发生正负电荷中和，并伴随有 1 个陡电流脉冲，同时向周围辐射电磁

波[79]。1999 年，法国 CIGRE 工作组 15/33.03.05 描述了 GIS 特高频局部放电检测系统灵敏度验证的两个步骤，确保 UHF 检测出视在电荷 5 pC 或更大的缺陷[80]。2016 年，该工作组将超高频信号参数与 IEC 60270 装置测量缺陷的视在电荷量相关联，提出了能够测试缺陷视在电荷量的特高频检测系统[81]。2020 年，清华大学等结合 IEC 60270 和 UHF 研究了以前很少关注的含亚毫米真空裂纹缺陷真型支柱绝缘子的局部放电特性，发现亚毫米真空裂纹表现为场发射引起的辉光放电，其放电发展相对缓慢，导致电磁信号频率相对较低，无法通过常规 UHF 检测[82]。

超声无损检测技术可以检测 GIS 绝缘子固化成型缺陷[83]。华南理工大学 2019 年探索了超声无损检测 GIS 绝缘子缺陷的方法，先后提出了利用缺陷反射波传播时间计算 GIS 盆式绝缘子相同材料和工艺试样缺陷深度的方法[84]，含不同取向、高度裂纹试样超声临界折射纵波检测法[85]；2021 年提出了 GIS 盆式绝缘子密度均匀性的超声无损反射检测方法[9]。2022 年提出了超声临界折射纵波在环氧复合材料中传播深度(即次表面热应力测量深度)检测方法和盆式绝缘子次表面热应力声距差检测方法[86]。2024 年建立了三相共箱盆式绝缘子圆台区域超声纵波反射传播模型，提出了圆台缺陷定位和定量的超声检测方法；某变电站 GIS 设备运行时因特高频局部放电异常而退役的 126 kV 三相共箱盆式绝缘子，实验室局部放电量脉冲电流法检测仅 1.95 pC 仍为合格绝缘子，而超声可以定位、定量 A 相绝缘子圆台缺陷，与 X 射线成像结果一致[75]。同年，研制了环氧复合绝缘材料内部缺陷超声自动成像系统，实现了环氧复合绝缘材料内部集中缺陷和密度不均匀检测的统一[87]。这为绝缘子出厂试验和故障分析缺陷定位、定量提供了技术手段。

上述 GIS 绝缘子缺陷检测方法在灵敏度、可视化及定位、定量方面各有优劣，目前还不是解决绝缘子固化残余应力过大以及缺陷产生机理的有效观测、研究手段。

3.2 环氧固化特征检测

环氧固化特征常用检测方法有：差示扫描量热分析、热机械分析(thermo-mechanical analysis, TMA)、动态机械分析(dynamic mechanical analyzer, DMA)、流变仪、光纤光栅技术和介电分析(dielectric analysis, DEA)等。环氧树脂固化过程中的放热行为与官能团类型、数量有关，固化反应过程复杂。材料固化收缩特性和残余应力/应变产生机理通常需要多个试验测试其固化特征。

DSC 常被用于研究材料固化动力学，可以定量描述环氧体系内部交联过程，例如反应速率与温度、固化度之间的关系[88]。学者通过对环氧树脂固化机理模型总结和实验数据分析，主要发展了 3 种固化动力学模型：*n* 级模型、SB 自催化模型和 Kamal 自催化模型[89]。2008 年，西班牙 A.Tejado 等用 Ozawa 和 Kissinger 建立的简单模型和 Kissinger-Akahira-Sunose 法研究一种含有木质素热塑性酚醛树脂的固化动力学，指出加成反应主导了酚醛树脂的固化过程[90]。2016 年，加拿大 R.Subbiah 等用等温 DSC 测试了双酚 A 型环氧树脂和三亚乙基四胺(TETA)体系的固化反应动力学，提出了表征该体系动力学行为的特定模型，在计算固化速率和固化程度方面比 Kamal 自催化模型更加合理[91]。2020 年，哈尔滨工程大学等用非等温动力学分析(Kissinger 和 Ozawa)、等转换方法(Flynn-Wall-Ozawa 和 Kissinger-Akahira-Sunose)和自催化模型研究了聚醚醚酮(PEEK)/环氧复合材料的固化动力学，发现等转化方法可以很好地解释 PEEK/环氧体系的固化行为，自催化反应模型计算的理论 DSC 曲线与实验数据较符合[92]。2021 年，合肥工业大学等用非等温 DSC 研究了 GIS 盆式绝缘子用环氧/Al_2O_3 复合体系固化动力学，发现 DSC 曲线会随着固化剂含量增加由双峰转变为单峰，符合 SB(*m*,*n*)自催化模型，自催化反应在固化反应中起主导作用[35]。

环氧固化收缩的测量可以分为体积膨胀法和非体积膨胀法。体积膨胀法测量材料的总固化收缩，传统测量用毛细管式和柱塞式膨胀计等[93]，但其测量精度很大程度上受目测或设备密封性影响，且与流体直接接触也可能影响环氧固化。2016 年，德国 W.Exner 等基于轮廓分析用视频成像测定热固化环氧体积收缩，该方法环氧与设备相互作用小、样本量小，测得液滴形环氧的体积收缩与水银膨胀仪、流变仪测量值基本一致[94]。非体积膨胀法通过接触式或非接触式传感器从材料的一维或二维应变中获得固化收缩及其相关特征数据，有利于分析材料固化过程物理和化学反应。1990 年，日本越智光一等提出应变仪测量钢环外部环氧树脂固化收缩的方法，测试了 4 种 *α*,*ω*—二胺固化双酚型环氧树脂体系，指出环氧玻璃化后收缩会产生内应力，且依赖

玻璃态时的收缩量和弹性率[95]。2010 年，英国 D.U.Shah 等介绍了用流变仪实时监测聚酯树脂和环氧树脂固化收缩的新方法，结果表明流变仪能测量树脂胶凝后的收缩，且与传统氦基体积计读数一致[96]，但该方法需要提前确定树脂的黏弹性特性，且操作复杂。

光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)由于直径小、灵敏度高和耐高温等优点，传感环氧固化过程应变和温度演化更具优势[97]。更重要的是，FBG 可以检测材料固化过程中多个固化特征，见表 1。其是波长调制型光纤传感器，通过将布拉格反射器构建在光纤纤芯上形成，见图 4。常规光纤的纤芯、包层和涂层直径分别为 10、125 和 250 μm。宽带光入射到光栅后，特定波长的窄带光会被反射；反射光的中心波长λ取决于光栅周期 Λ 和纤芯有效折射率 n_{eff}，且主要受应变和温度影响[98]。

光纤光栅为材料固化过程提供了独特的原位测量。2005 年，意大利 V.Antonucci 等用光纤光栅检测试验和仿真研究了铝模具和钢模具对环氧固化过程应变的影响，指出铝模具中环氧应变水平更大，且固化过程应变很大程度上取决于模具约束[102]。2007 年，德国 M.Harsch 等用光纤光栅检测铝模具无外力约束下环氧固化过程应变，指出光纤光栅可以测得材料凝胶化后的固化收缩，且测得凝胶化时间、玻璃化转变温度和热膨胀系数分别与流变仪、DSC 和 TMA 测量结果一致，见图 5 和表 2[100]。2010 年，荷兰 P.P.Parlevliet 等验证了复合树脂固化收缩的光纤光栅检测结果与基于浮力原理体积膨胀法相似。尽管体积膨胀法可以测量材料的总固化收缩，光纤光栅仅能测得材料凝胶化后的固化收缩，但最终测得材料固化收缩是相似的[103]。同年，他们用光纤光栅研究了 20 ℃恒温固化复合树脂残余应变的产生，指出玻璃化发生在放热峰值温度之后，且残余应变大约一半是由化学收缩引起，另一半是由玻璃化后的热收缩引起[104]。2021 年，西安交通大学等用光纤光栅和非等温 DSC 研究了环氧/Al_2O_3 复合体系的固化收缩，发现热收缩较反应收缩占比大，并仿真验证了脱模对环氧固化收缩的影响[34]。2024 年，华南理工大学等基于环氧树脂初始固化收缩率和固化前后光纤光栅总偏移量提出了一种检测凝胶化时间和残余应变的方法，指出环氧固化收缩和残余应变受化学收缩、热膨胀/收缩和脱模共同影响，且玻璃模具对环氧固化收缩干扰大[54]。

表 1 环氧固化特征参量常用检测方法对比

Table 1 Common detection methods of epoxy curing characteristics

方法	检测参量
FBG	凝胶化时间、凝胶化温度、玻璃化转变温度、固化度、固化起始时间、固化完成时间和残余应变等[99]
DSC	固化度和玻璃化转变温度等[24]
TMA	玻璃化转变温度和热膨胀系数等[100]
DMA	玻璃化转变温度、机械模量和固化收缩率等[23]
流变仪	凝胶化和固化收缩率等[96]
DEA	固化度和玻璃化转变温度等[101]

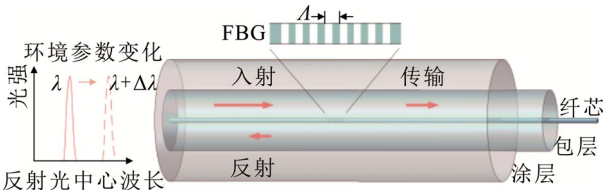


图 4 光纤布拉格光栅结构和传感原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of FBG structure and sensing principle

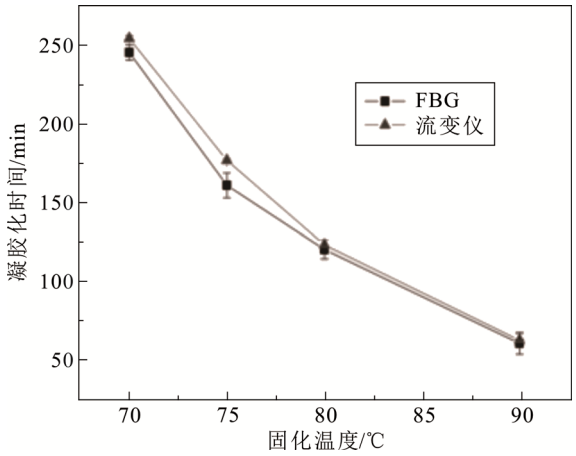


图 5 不同固化温度下环氧凝胶化时间的 FBG 和流变仪测试结果对比[100]

Fig.5 Gel time at different curing temperatures for FBG and rheometer of epoxy[100]

表 2 环氧固化完成后玻璃化转变温度和热膨胀系数的 FBG、TMA 和 DSC 测试结果对比[100]

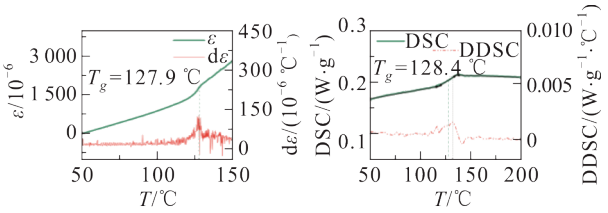
Table 2 T_g and thermal expansion coefficient for FBG, TMA, and DSC of the fully cured epoxy resin

检测方法	T_g/℃	热膨胀系数/(10^{-6} K^{-1})	
		$T<T_g$	$T>T_g$
FBG	146	28	129
TMA	141	32	134
DSC	144	—	—

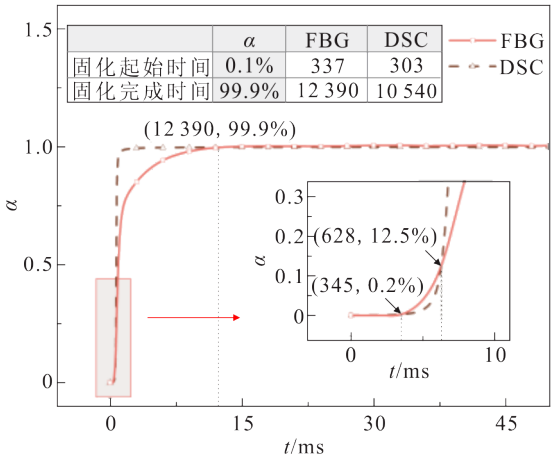
为克服因放热效应环氧树脂初始膨胀的问题，2020 年，美国 J.Hoffman 等提出了用最大曲率法原位识别环氧树脂凝胶化，在模具外侧增加一根光纤光栅用于测试固化过程环境温度，基于热平衡定律提出固化结束时间的迭代计算方法，但该方法计算得到的凝胶点受数据采样率影响较大[105]。2025 年，华南理工大学提出了 GIS 环氧/Al_2O_3 复合绝缘材料 7 个高温固化特征的热电偶补偿 FBG 原位同时检测方法，包括凝胶化时间、凝胶化温度、玻璃化转变温度、固化度、固化起始时间、固化完成时间和残余应变。玻璃化转变温度、固化起始时间和固化完成时间的 FBG 与 DSC 测试结果分别相差 0.39%、11.2%和 17.6%，见图 6，指出降低固化度检测误差可以考虑优化计算过程中对流冷却速率[99]。

GIS 绝缘子实际生产浇注固化前需进行中心嵌件清洗、界面工艺处理、装模和模具预热[106-107]，光纤光栅可以在装模前布置，以便监测 GIS 绝缘子同批次同配方同工艺浇注试样固化过程。结合固化仿真模型、多批次试验等，建立 GIS 绝缘子配方、工艺的环氧复合材料和金属-环氧界面固化特征数据库，优化绝缘子配方和工艺。2024 年，西安理工大学等将光纤光栅和热电偶固定在铝嵌件上，且穿过模具，研究等比例缩小、结构简化的盆式绝缘子铝-环氧界面固化过程中温度和应变的变化；建立了盆式绝缘子固化过程化学-热-固化应变多物理场耦合模型，界面应变仿真结果与试验一致；用多目标遗传算法优化固化工艺，优化后盆式绝缘子较原工艺的残余应变降低了 7.6%，最大固化度差值降低了 62.41%，经济因素降低了 33.59%[108]。GIS 绝缘子实际生产场景中多个固化特征参量的光纤光栅检测还需要进一步研究验证。

综上所述，光纤光栅可以检测环氧复合材料的多个固化特征参量。已有光纤光栅检测很少涉及多个固化特征参量和缺陷的测量；已有研究限于常温固化的环氧/Al_2O_3 和高温固化的其他非环氧/Al_2O_3 等复合材料的固化特征测量，高温固化的 GIS 绝缘子环氧复合材料的固化特征研究尚少；已有 GIS 绝缘子环氧复合材料的固化特征和残余应力/应变产生机理研究仅基于 2、3 个参量，指出残余应力是由环氧体系的化学收缩、热膨胀/收缩和脱模共同引起，较少考虑材料和界面的多个固化特征，固化交联过程中材料和界面的残余应力/应变演变规律以及缺陷产生机理研究仍显薄弱。



(a) 玻璃化转变温度的FBG(左)和DSC(右)测试结果对比



(b) 固化度、固化起始时间和固化完成时间的FBG和DSC测试结果对比

图 6 环氧固化特征的 FBG 和 DSC 测试结果对比[99]

Fig.6 Curing characteristics for FBG and DSC of epoxy[99]

4 总结与展望

1）目前 GIS 绝缘子材料和界面的固化收缩特性和残余应力产生机理研究已取得初步进展。气泡活动机理和裂纹扩展机理可以用于研究绝缘子材料和界面固化过程中气泡和裂纹等缺陷的产生。

2）国内外相关研究仍存在以下问题：GIS 绝缘子材料、界面的残余应力/应变和集中缺陷与固化收缩密切相关，而材料和界面的固化特征因缺乏检测手段研究尚不完善；模型简化局限，考虑填料沉降等实际工艺扰动的研究尚少；残余应力/应变、集中缺陷与固化特征之间没有明确的关联；材料和界面的缺陷产生机理研究尚少，界面缺陷阈值模糊，是国内外研究的难点；我国 GIS 高性能绝缘子用材料仍依赖进口，急需研究工艺、配方等试验评价技术。

3）光纤光栅技术在多个固化特征原位检测方面具备优势，包括凝胶化时间、凝胶化温度、玻璃化转变温度、固化度、固化起始时间、固化完成时间和残余应力/应变等，为以下 GIS 绝缘子未来发展趋势提供有效的试验研究手段和数字化监造技术。(1)固化特征：研究 GIS 绝缘子材料和界面的固化特征，提出固化特征检测方法。(2)残余应力机理：揭示材料、界面的固化收缩特性和残余应力产生机理，

预测和控制残余应力。(3)缺陷机理：结合固化动力学、固化特征、化学-热-固化应变多物理场耦合仿真、气泡活动机理和裂纹扩展相场模型等理论，考虑填料沉降等实际工艺扰动，综合 GIS 绝缘子材料和界面固化过程中残余应力/应变的产生和累积、缺陷的产生机制与临界条件，建立缺陷与固化特征的关联模型，找出缺陷产生阈值和抑制措施。(4)数字化监造技术：与 GIS 绝缘子同批次同配方同工艺浇注试样固化过程监测，建立 GIS 绝缘子配方、工艺的环氧复合材料和金属-环氧界面固化特征数据库，提高 GIS 绝缘子可靠性。

参考文献 References

[1] 唐文虎，聂欣昊，钱 瞳，等. 面向新型电力系统安全稳定的储能应用技术研究综述与展望[J]. 广东电力，2024，37(12)：3-15.
TANG Wenhu, NIE Xinhao, QIAN Tong, et al. Review and prospect on application technologies of energy storage for safety and stability of new power system[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(12): 3-15.

[2] 盛戈皞，钱 勇，罗林根，等. 面向新型电力系统的电力设备运行维护关键技术及其应用展望[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3072-3084.
SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Lingen, et al. Key technologies and application prospects for operation and maintenance of power equipment in new type power system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3072-3084.

[3] 韩旭涛，史天一，王昊天，等. 基于实体 GIS 设备试验的局部放电光学信号传播特性研究[J]. 广东电力，2024，37(3)：82-89.
HAN Xutao, SHI Tianyi, WANG Haotian, et al. Study on propagation characteristics of partial discharge optical signals based on physical GIS equipment testing[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(3): 82-89.

[4] 张连根. 长期耐压下 GIS 绝缘子表面金属异物局部放电特性和闪络机理研究[D]. 北京：华北电力大学，2020：1-2.
ZHANG Lian'gen. Research on partial discharge characteristics and flashover mechanism of metal particle on GIS insulator under long-term voltage[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2020: 1-2.

[5] 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.

[6] 刘 钊，李晓溪，弓艳朋，等. 基于声光联合法发现的 GIS 内部绝缘子裂纹引起的局部放电缺陷[J]. 广东电力，2023，36(9)：100-106.
LIU Zhao, LI Xiaoxi, GONG Yanpeng, et al. A partial discharge defect caused by cracks in GIS internal insulator based on acoustic and optic joint[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(9): 100-106.

[7] 邵先军，詹江杨，常丁戈，等. 550 kV GIS 盆式绝缘子多气泡放电的测试与诊断[J]. 高电压技术，2020，46(2)：554-560.
SHAO Xianjun, ZHAN Jiangyang, CHANG Dingge, et al. Test and diagnosis of multiple voids discharge for 550 kV GIS insulation spacer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 554-560.

[8] 高 竣，邱 炜，蔡 川，等. 某 110 kV GIS 盆式绝缘子局部放电检测与解体分析[J]. 四川电力技术，2023，46(5)：86-90.
GAO Jun, QIU Wei, CAI Chuan, et al. Partial discharge detection and disassembly analysis of a 110 kV GIS basin-type insulator[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2023, 46(5): 86-90.

[9] 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.

[10] 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.

[11] SIRIVEDIN S, FENNER D N, NATH R B, et al. Matrix crack propagation criteria for model short-carbon fibre/epoxy composites[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(15): 2835-2847.

[12] HARSCH M, KARGER-KOCSIS J, HERZOG F, et al. Effect of cure regime on internal strain and stress development in a filled epoxy resin assessed by fiber Bragg-grating optical strain and normal force measurements[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2011, 30(17): 1417-1427.

[13] ZHANG F, JU P F, PAN M Q, et al. Self-healing mechanisms in smart protective coatings: a review[J]. Corrosion Science, 2018, 144: 74-88.

[14] LI J, LIU S T, LIANG H C, 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.

[15] WANG C, ZHOU G, SUN Q, et al. 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.

[16] 夏欣倩，祝子绚，刘 琳，等. 小型化 GIS 隔板绝缘子电场优化设计[J]. 广东电力，2024，37(4)：105-114.
XIA Xinqian, ZHU Zixuan, LIU Lin, et al. Optimization design of electric field for miniaturized GIS clapboard insulators[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(4): 105-114.

[17] 陈 平，刘胜平，王德中. 环氧树脂及其应用[M]. 北京：化学工业出版社，2011：2.
CHEN Ping, LIU Shengping, WANG Dezhong. Epoxy resin and its applications[M]. Beijing, China: Chemical Industry Press, 2011: 2.

[18] 韦雅荣，饶夏锦，张 磊，等. 基于亚胺键的环保型环氧树脂的制备与再生[J]. 广东电力，2024，37(9)：72-79.
WEI Yarong, RAO Xiajin, ZHANG Lei, et al. Preparation and regeneration of environmentally friendly epoxy based on imine bond[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(9): 72-79.

[19] DING Q Y, DING N, CHEN X F, et al. Effect of grain boundaries, cure, and temperature on the thermomechanical properties of epoxy/graphene composites[J]. Polymer Composites, 2024, 45(4): 3406-3421.

[20] YU H, MHAISALKAR S G, WONG E H. Observations of gelation and vitrification of a thermosetting resin during the evolution of polymerization shrinkage[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2005, 26(18): 1483-1487.

[21] HU H X, CAO D F, PAVIER M, et al. Investigation of non-uniform gelation effects on residual stresses of thick laminates based on tailed FBG sensor[J]. Composite Structures, 2018, 202: 1361-1372.

[22] MOHSENI M, ZOBEIRY N, FERNLUND G. Process-induced matrix defects: post-gelation[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 137: 106007.

[23] WANG Y, HAN B, KIM D W, et al. Integrated measurement technique for curing process-dependent mechanical properties of polymeric materials using fiber Bragg grating[J]. Experimental Mechanics, 2008, 48(1): 107-117.

[24] KARKANAS P I, PARTRIDGE I K. Cure modeling and monitoring of epoxy/amine resin systems. Ⅱ. Network formation and chemoviscosity modeling[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2000, 77(10): 2178-2188.

[25] 司 剑，文 韬，赵 毅，等. 高频方波电场-温度场作用下环氧树脂介电特性劣化协同效应[J]. 高电压技术，2024，50(9)：4007-4018.
SI Jian, WEN Tao, ZHAO Yi, et al. Synergistic effect of epoxy resin

dielectric properties deterioration under the action of high-frequency square wave electric field-temperature field[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(9): 4007-4018.

[26] 孙曼灵. 热固性树脂基体的收缩与内应力[J]. 热固性树脂，1993(4)：49-55.
SUN Manling. Contraction and internal stress of thermosetting resin matrixes[J]. Thermosetting Resin, 1993(4): 49-55.

[27] WANG Y, WOODWORTH L, HAN B. Simultaneous measurement of effective chemical shrinkage and modulus evolutions during polymerization[J]. Experimental Mechanics, 2011, 51(7): 1155-1169.

[28] EOM Y, BOOGH L, MICHAUD V, et al. Internal stress control in epoxy resins and their composites by material and process tailoring[J]. Polymer Composites, 2002, 23(6): 1044-1056.

[29] KELLY G, LYDEN C, LAWTON W, et al. Importance of molding compound chemical shrinkage in the stress and warpage analysis of PQFPs[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part B, 1996, 19(2): 296-300.

[30] WEN M, SCRIVEN L E, MCCORMICK A V. Differential scanning calorimetry and cantilever deflection studies of polymerization kinetics and stress in ultraviolet curing of multifunctional (meth) acrylate coatings[J]. Macromolecules, 2002, 35(1): 112-120.

[31] BOGETTI T A, GILLESPIE J W. Process-induced stress and deformation in thick-section thermoset composite laminates[J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26(5): 626-660.

[32] 赵玉顺，郑天祺，杨克荣，等. 环氧树脂/酸酐绝缘材料固化体系残余应力影响因素研究[J]. 绝缘材料，2019，52(2)：24-28，34.
ZHAO Yushun, ZHENG Tianqi, YANG Kerong, et al. Influence factors of residual stress in epoxy resin/anhydride insulating material curing system[J]. Insulating Materials, 2019, 52(2): 24-28, 34.

[33] 刘育豪，林 莹，王黎明，等. 脂环族环氧树脂绝缘子内部固化反应与温度场数值分析[J]. 高电压技术，2020，46(6)：1986-1993.
LIU Yuhao, LIN Ying, WANG Liming, et al. Internal curing reaction and numerical analysis of temperature field of cycloaliphatic epoxy resin insulators[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 1986-1993.

[34] 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.

[35] 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.

[36] 阮智玮，阚超豪，王 垒. 盆式绝缘子温度场仿真分析[J]. 电气工程学报，2019，14(3)：41-46.
RUAN Zhiwei, KAN Chaohao, WANG Lei. Simulation analysis of temperature field of basin insulator[J]. Journal of Electrical Engineering, 2019, 14(3): 41-46.

[37] WANG C, ZHU W Y, ZHOU G, et al. Mechanism of stress generation at the epoxy-epoxy interface[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 685: 133209.

[38] 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.

[39] 王荣国，田 秋，马文有，等. 数值计算模拟复合材料固化中夹杂气泡的影响和残余应力的变化[J]. 复合材料学报，2002，19(5)：95-101.
WANG Rongguo, TIAN Qiu, MA Wenyou, et al. Modulating void action and residual stress variation of composite materials during curing process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2002, 19(5): 95-101.

[40] 张润理，阎 涛，李逸飞，等. 固封极柱用环氧树脂固化物开裂问题研究及预防措施[J]. 高压电器，2014，50(5)：126-133.
ZHANG Runli, YAN Tao, LI Yifei, et al. Analysis and prevention of cracking of cured epoxy resin for embedded pole[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5): 126-133.

[41] MI H R, HAO Y P, LIANG Z Y, et al. Crack propagation simulation and experimental validation in fracture toughness tests of GIS epoxy insulators[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 6002010.

[42] 伍云健，胡益然，林 慧，等. 基于席夫碱基的可降解环氧绝缘材料性能研究[J]. 高电压技术，2023，49(11)：4490-4497.
WU Yunjian, HU Yiran, LIN Hui, et al. Study on properties of degradable epoxy insulation materials based on schiff base[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4490-4497.

[43] YE S, CRAMER N B, BOWMAN C N. Relationship between glass transition temperature and polymerization temperature for cross-linked photopolymers[J]. Macromolecules, 2011, 44(3): 490-494.

[44] 丁江平，廖 栋，范欣愉. 非等温 DSC 法研究复合材料用环氧树脂的固化反应[J]. 材料导报，2011，25(14)：139-143.
DING Jiangping, LIAO Dong, FAN Xinyu. Study on curing reaction of epoxy used in composites by non-isothermal DSC method[J]. Materials Reports, 2011, 25(14): 139-143.

[45] WHITE S R, HAHN H T. Cure cycle optimization for the reduction of processing-induced residual stresses in composite materials[J]. Journal of Composite Materials, 1993, 27(14): 1352-1378.

[46] CHEN Y, XIA Z H, ELLYIN F. Evolution of residual stresses induced during curing processing using a viscoelastic micromechanical model[J]. Journal of Composite Materials, 2001, 35(6): 522-542.

[47] OGI K. Influence of thermal history on transverse cracking in a carbon fiber reinforced epoxy composite[J]. Advanced Composite Materials, 2002, 11(3): 265-275.

[48] HARSCH M, KARGER-KOCSIS J, HERZOG F. Influence of cure regime on the strain development in an epoxy resin as monitored by a fiber Bragg grating sensor[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2007, 292(4): 474-483.

[49] RUSSELL J D, MADHUKAR M S, GENIDY M S, et al. A new method to reduce cure-induced stresses in thermoset polymer composites, part Ⅲ: correlating stress history to viscosity, degree of cure, and cure shrinkage[J]. Journal of Composite Materials, 2000, 34(22): 1926-1947.

[50] 邓 丹，陈 允，崔博源，等. 盆式绝缘子用环氧浇注材料的固化工艺及性能研究[J]. 绝缘材料，2017，50(10)：21-25.
DENG Dan, CHEN Yun, CUI Boyuan, et al. Study on curing process and properties of epoxy casting materials for basin-type insulator[J]. Insulating Materials, 2017, 50(10): 21-25.

[51] 陈 蕊，袁端鹏，王亚祥，等. 高压开关用环氧浇注绝缘子的快速固化工艺[J]. 热固性树脂，2025，40(1)：51-55.
CHEN Rui, YUAN Duanpeng, WANG Yaxiang, et al. Rapid curing process of epoxy cast insulators for high voltage switchgear[J]. Thermosetting Resin, 2025, 40(1): 51-55.

[52] 邱长江，李国福. 环氧树脂浇注的固化收缩和浇口冷却法[J]. 高压电器，1994，30(2)：52-54.
QUI Changjiang, LI Guofu. Curing shrinkage and gate cooling method for epoxy resin casting[J]. High Voltage Apparatus, 1994, 30(2): 52-54.

[53] 王好盛，张冬海，薛 杨，等. α-氧化铝粒径和形貌对 GIS 用环氧树脂复合材料介电性能和热性能影响的研究[J]. 化工新型材料，2016，44(7)：43-45.
WANG Haosheng, ZHANG Donghai, XUE Yang, et al. Influence of size and morphology of α-Al_2O_3 on the dielectric and thermal properties of epoxy resin composite[J]. New Chemical Materials, 2016, 44(7): 43-45.

[54] HAO Y P, ZHANG Y Y, SHEN Z K, et al. Fiber Bragg grating detection of gel time and residual strain of curing in epoxy resins[J]. Polymer Engineering & Science, 2024, 64(7): 3101-3108.

[55] 郝留成，杨保利，田 浩，等. 特高压盆式绝缘子工艺技术研究[J]. 绝缘材料，2014，47(5)：45-49.
HAO Liucheng, YANG Baoli, TIAN Hao, et al. Study of process technology of UHV basin insulator[J]. Insulating Materials, 2014, 47(5): 45-49.

[56] 何 愈，何俊凌，赵玉顺，等. 特高压电气设备用高性能复合绝缘材料配方的研制[J]. 热固性树脂，2020，35(6)：54-61.
HE Yu, HE Junling, ZHAO Yushun, et al. Development of high performance composite insulating material formula for UHV electrical equipment[J]. Thermosetting Resin, 2020, 35(6): 54-61.

[57] HAO Y P, LIANG Z Y, SHEN Z K, et al. Application of ultrasound in fracture toughness measurement of GIS epoxy insulators[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 6004208.

[58] 杨 帆，郝翰学，王鹏博，等. 电力装备多物理场数值计算发展现状[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2348-2364.
YANG Fan, HAO Hanxue, WANG Pengbo, et al. State of the art of multiphysics simulation technology for power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2348-2364.

[59] OHSAKO F, YOSHIZAWA K. Molecular theory of adhesion of metal/epoxy resin interface[J]. Kobunshi Ronbunshu, 2011, 68(2): 72-80.

[60] YANG S R, GAO F, QU J M. A molecular dynamics study of tensile strength between a highly-crosslinked epoxy molding compound and a copper substrate[J]. Polymer, 2013, 54(18): 5064-5074.

[61] MUNKERT H, VOIGTS F, WEGEWITZ L, et al. The interaction of epoxy adhesives with steel surfaces[J]. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 2013, 44(1): 36-43.

[62] 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.

[63] 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.

[64] 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.

[65] 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.

[66] WANG C, LEI K, SUN Q, et al. Stress concentration effect in interface between conductor and epoxy resin in coaxial components of power equipment[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2024, 10(1): 412-420.

[67] 刘智鹏，魏 来，李庆民，等. GIL 支柱绝缘子嵌件-环氧界面缺陷演化过程与放电脆裂机制[J]. 高电压技术，2024，50(1)：359-369.
LIU Zhipeng, WEI Lai, LI Qingmin, et al. Defects evolution process and mechanism of discharge embrittlement of GIL post insulator inserts and epoxy interface[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 359-369.

[68] ABIKO K, KATO Y, HOHJO H, et al. Raman imaging of residual stress distribution in epoxy resin and metal interface[J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2020, 51(1): 193-200.

[69] 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.

[70] MATSUSHIMA M, KATO Y, TAKECHI Y, et al. Effects of metal surface conditions on interfacial characteristics between metal and epoxy resin[J]. Materials Transactions, 2016, 57(6): 881-886.

[71] 孙 青. 电力设备中导体与绝缘界面处固化残余应力的机理研究[D]. 西安：西安理工大学，2021：3-4.
SUN Qing. Mechanism research of process-induced residual strain at the interface of conductor and insulation in power equipment[D]. Xi'an, China: Xi'an University of Technology, 2021: 3-4.

[72] 彭宗仁，张鹏飞，刘 鹏，等. 苏通综合管廊工程特高压 GIL 绝缘关键技术[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4046-4057.
PENG Zongren, ZHANG Pengfei, LIU Peng, et al. Key insulation technology of UHV GIL in Sutong utility tunnel project[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4046-4057.

[73] 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.

[74] LIU P, ZHU S J, XIE Z L, et al. Semiconductive buffer layer for the conductor-insulator interface of HVDC GIS/GIL[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(5): 2759-2767.

[75] HAO Y P, ZHANG Y Y, SHEN Z K, et al. Ultrasonic longitudinal wave reflection propagation model and defect detection method for the cone of 126-kV three-phase basin insulators[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 9004608.

[76] 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.

[77] JIN B, PARK N, GEORGE K M, et al. Modeling and analysis of soft-test/repair for CCD-based digital X-ray systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2003, 52(6): 1713-1721.

[78] SCHICHLER U, KOLTUNOWICZ W, ENDO F, et al. Risk assessment on defects in GIS based on PD diagnostics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2165-2172.

[79] HAN X T, LI J H, ZHANG L, et al. A novel PD detection technique for use in GIS based on a combination of UHF and optical sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(8): 2890-2897.

[80] BOECK W, ALBIEZ M, BENGTSSON T, et al. Partial discharge detection system for GIS: sensitivity verification for the UHF method and the acoustic method[J]. Électra, 1999(183): 75-87.

[81] SCHICHLER U, KOLTUNOWICZ W, GAUTSCHI D, et al. UHF partial discharge detection system for GIS: application guide for sensitivity verification: CIGRE WG D1.25[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(3): 1313-1321.

[82] 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.

[83] 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.

[84] 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.

[85] 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 Zhouyi'ao, 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.

[86] HAO Y P, ZHENG Y, HE W M, et al. A measurement method of ul-

trasonic critical refraction longitudinal wave for thermal stress in GIS basin-type insulators[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 6001009.

[87] 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.

[88] VYAZOVKIN S, BURNHAM A K, CRIADO J M, et al. ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data[J]. Thermochimica Acta, 2011, 520(1/2): 1-19.

[89] VYAZOVKIN S, CHRISSAFIS K, DI LORENZO M L, et al. ICTAC Kinetics Committee recommendations for collecting experimental thermal analysis data for kinetic computations[J]. Thermochimica Acta, 2014, 590: 1-23.

[90] TEJADO A, KORTABERRIA G, LABIDI J, et al. Isoconversional kinetic analysis of novolac-type lignophenolic resins cure[J]. Thermochimica Acta, 2008, 471(1/2): 80-85.

[91] SUBBIAH R, TJONG J, NAYAK S K, et al. Cure kinetics characterization of soy-based epoxy resins for infusion moulding process[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2016, 94(7): 1375-1380.

[92] ZHENG T, 刈 H, WANG Z X, et al. The curing kinetics and mechanical properties of epoxy resin composites reinforced by PEEK microparticles[J]. Polymer Testing, 2020, 91: 106781.

[93] LI C, POTTER K, WISNOM M R, et al. In-situ measurement of chemical shrinkage of MY750 epoxy resin by a novel gravimetric method[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(1): 55-64.

[94] EXNER W, KÜHN A, SZEWIECZEK A, et al. Determination of volumetric shrinkage of thermally cured thermosets using video-imaging[J]. Polymer Testing, 2016, 49: 100-106.

[95] 越智光一，周俊银. 环氧树脂固化物的内部应力[J]. 绝缘材料通讯，1990(6)：41-48.
KOUICHI K, ZHOU Junyin. Internal stresses in epoxy-cured materials[J]. Insulation Material Communication, 1990(6): 41-48.

[96] SHAH D U, SCHUBEL P J. Evaluation of cure shrinkage measurement techniques for thermosetting resins[J]. Polymer Testing, 2010, 29(6): 629-639.

[97] 郝艳捧，韦 杰，黄 磊，等. 复合绝缘子界面光纤植入方法与界面性能试验[J]. 广东电力，2022，35(4)：71-79.
HAO Yanpeng, WEI Jie, HUANG Lei, et al. Implantation method of optical fiber over the interface of composite insulator and interface performance experiment[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(4): 71-79.

[98] 马国明，王思涵，张晓星，等. 变电设备状态信息光纤/光学传感研究[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3354-3386.
MA Guoming, WANG Sihan, ZHANG Xiaoxing, et al. Research on optical fiber/optical sensing for state information of transformer equipment[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3354-3386.

[99] ZHANG Y Y, HAO Y P, SHEN Z K, et al. Fiber Bragg grating in-situ detection method for curing characteristics of GIS epoxy/Al_2O_3 composite insulation materials[J]. Polymer Testing, 2025, 143: 108701.

[100] HARSCH M, KARGER-KOCSIS J, HERZOG F. Monitoring of cure-induced strain of an epoxy resin by fiber Bragg grating sensor[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 107(2): 719-725.

[101] WU Z C, CHEN Q Y, LIU D X, et al. *In situ* monitoring of epoxy resin curing process: using glass transition as a bridge[J]. Polymer Testing, 2023, 117: 107871.

[102] ANTONUCCI V, CUSANO A, GIORDANO M, et al. Cure-induced residual strain build-up in a thermoset resin[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(4): 592-601.

[103] PARLEVLIET P P, BERSEE H E N, BEUKERS A. Shrinkage determination of a reactive polymer with volumetric dilatometry[J]. Polymer Testing, 2010, 29(4): 433-439.

[104] PARLEVLIET P P, BERSEE H E N, BEUKERS A. Measurement of (post-)curing strain development with fibre Bragg gratings[J]. Polymer Testing, 2010, 29(3): 291-301.

[105] HOFFMAN J, KHADKA S, KUMOSA M. Determination of gel point and completion of curing in a single fiber/polymer composite[J]. Composites Science and Technology, 2020, 188: 107997.

[106] 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.

[107] 陈 静，臧春艳，龚禹璐，等. 超特高压 GIL 三支柱绝缘子研究述评[J]. 高压电器，2024，60(2)：143-155.
CHEN Jing, ZANG Chunyan, GONG Yulu, et al. Research review on tri-post insulator for EHV/UHV GIL[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 143-155.

[108] 朱卫宇. GIS 盆式绝缘子固化过程参数优化研究[D]. 西安：西安理工大学，2024.
ZHU Weiju. Research on parameter optimization of GIS basin-type insulator curing process[D]. Xi'an, China: Xi'n University of Technology, 2024.



张滢滢
1999—，女，博士
主要从事电气设备故障诊断及状态评价技术，新型绝缘材料成型工艺和新型智能传感技术的工程应用等方面研究
E-mail: 202210182589@mail.scut.edu.cn

ZHANG Yingying
Ph.D.



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，覆冰、污秽、海洋和雷电环境下输变电设备绝缘状态评估与预测，沿面放电、局部放电和介质阻挡放电等气体放电理论研究

HAO Yanpeng
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2025-04-08 在线出版日期 2025-08-29 编辑 曹昭君