

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2025.06.010

运行工况下特高压 GIL 三支柱绝缘子机械应力分布仿真研究

王亚祥¹, 刘松涛², 蔡玉龙², 王雨帆², 袁端鹏¹, 王明洋², 李 进³

(1. 平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001; 2. 国网天津市电力公司高压分公司, 天津 300232;

3. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 三支柱绝缘子是超/特高压气体绝缘输电管道(GIL)的关键绝缘支撑部件,其机械可靠性直接关系到 GIL 运行安全。文中考虑受热膨胀、电磁振动以及导杆偏转等工况,系统研究了 1 100 kV GIL 中三支柱绝缘子主应力分布与机械可靠性。主要结论如下:无负载电流下三支柱绝缘子最大拉应力与压应力分别位于下支腿及支腿/嵌件边界处,分别为 2.37 MPa 与 9.02 MPa;综合考虑热膨胀与管道振动影响后发现拉应力集中于绝缘子腹部与下支腿复合边界处,最大值为 16.6 MPa;因装配误差造成导杆偏转时,在与偏转位移相反方向的支腿边界处拉应力集中程度加剧。上述研究结果有望为提高超特高压三支柱绝缘子运行可靠性提供理论支撑。

关键词: 气体绝缘输电管道; 三支柱绝缘子; 多物理场; 机械应力

Simulation Study on Mechanical Stress Distribution of UHV GIL Tri-post Spacer Under Operating Conditions

WANG Yaxiang¹, LIU Songtao², CAI Yulong², WANG Yufan², YUAN Duanpeng¹,
WANG Mingyang², LI Jin³

(1. Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China; 2. High Voltage Branch, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300232, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Tri-post spacer is the key insulation support component of EHV and UHV gas-insulated transmission line (GIL), and its mechanical reliability is directly related to the safe operation of the GIL. In this paper, the principal stress distribution and mechanical reliability of the tri-post spacer in 1 100 kV GIL are systematically analyzed with consideration of the thermal expansion, electromagnetic vibration and conductor deflection. The main conclusions obtained are as follows: The maximum tensile stress and compressive stress of the tri-post spacer at no load current are located at the lower post and the post-insert boundary, which are 2.37 MPa and 9.02 MPa respectively. It is found after comprehensive considering the influence of thermal expansion and pipeline vibration that the tensile stress is are located in the abdomen of the spacer and the boundary of lower posts, and the maximum value is 16.6 MPa. In case of conductor deflection due to assembly error, the tensile stress concentration at the boundary of the post opposite to the deflection displacement increases. The results above can provide theoretical support for improving the reliability of GIL tri-post spacer.

Key words: GIL; tri-post spacers; multi-physics; mechanical stress distribution

0 引言

气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)凭借传输容量大、占用空间小、可靠性高等优势,在超特高压输

变电系统中应用规模逐渐扩大,其中三支柱绝缘子在 GIL 内承担机械支撑与电气绝缘的关键作用。随着 GIL 输电工程的不断发展,三支柱绝缘子安装数量逐步增加,绝缘子相关故障已占 GIL 工程问题的

收稿日期:2024-12-18; 修回日期:2025-03-22

基金项目:国家自然科学基金(51807136)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51807136).

60%以上,给电力系统安全稳定运行带来严重威胁^[1-4]。超特高压 GIL 三支柱绝缘子在电—磁—热—流体多场耦合条件下机械应力分布特性复杂,应力集中导致的缺陷或微损伤引发机械故障及放电击穿甚至炸裂等事故时有发生,给绝缘子结构设计与制造提出了严苛要求,迫切需要准确分析并掌握运行工况下三支柱绝缘子机械应力分布与可靠性水平^[5-6]。

目前,国内外学者对于 GIL 三支柱绝缘子相关设计、应力仿真等方面进行了一定的研究。文[7-8]建立了 1 100 kV GIL 三支柱绝缘子多物理场仿真模型,基于遗传算法对绝缘子结构参数进行了优化,校核了处于运输状态时绝缘子应力分布情况,研究表明三支柱绝缘子包覆套筒处是薄弱环节,应重点关注。文[9]对特高压 GIL 哑铃型三支柱结构参数进行智能结构优化,通过样条曲线拟合控制绝缘子形状,其研究结果有效地改善了绝缘子整体性能。彭宗仁等人通过对环氧树脂复合材料电气、热学以及机械性能开展研究,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^[10]。

已有研究多集中在绝缘子结构设计与运输状态下及未投入运行时的应力分布特点等方面。但缺乏考虑绝缘子温度梯度分布特性的实际运行工况下机械应力分布规律研究,以及导杆偏转与最大温升等严苛工况下应力分布情况的深入分析;对于环氧/氧化铝的复合绝缘材料类型,使用基于形状改变比能理论的结果分析方法的准确性也有待提高,亟需应用更加合理的脆性材料机械可靠性评估方法来校核绝缘子的机械强度失效风险^[11-13]。

为此,文中考虑电、热、磁和流体的多物理场耦合作用,对特高压 GIL 中三支柱绝缘子的机械应力分布情况进行仿真建模:综合考虑了导体温升引起的热膨胀作用与管道电磁振动情况,并校核了导杆横向偏转的影响,利用脆性材料主应力分析方法,确定了三支柱绝缘子的应力分布特点,为提高超特高压 GIL 绝缘子机械可靠性与运行稳定性提供了理论参考。

1 模型结构与仿真原理

1.1 几何结构与控制方程

GIL 内部结构包括导杆、微粒收集器、套筒与三支柱绝缘子(含嵌件),此外管道内部还充有 0.5 MPa 的 SF₆ 绝缘气体^[14]。套筒包覆中心导杆后与三支柱绝缘子粘接,绝缘子各支腿顶端处附有嵌件,通过嵌件固定螺母连接于壳体;嵌件与壳体间安装有微粒收集器,考虑其厚度将其与壳体进行联合建模。仿真模型几何结构见图 1。

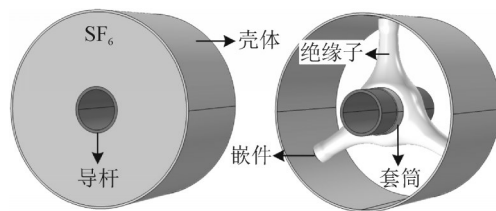


图1 模型几何结构

Fig. 1 Geometric structure of model

根据材料力学强度理论,复杂应力状态下材料强度失效形式主要有两种:脆断破坏和屈服失效^[15]。分别有 4 种强度理论阐述这两种破坏形式的规律,称为第一至第四强度理论。第一强度理论为最大拉应力理论,用来衡量无明显变形下的突然断裂。而绝缘子通常由掺杂无机微米氧化铝填料的环氧树脂/酸酐固化而成,标准试样的断裂伸长率在 1%~3%,多用于第一类强度理论,因此其在达到弹性形变限度时,往往直接发生断裂,属于均匀的、各向同性的脆性材料,所以由广义胡克定律可知

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)}{E} \\ \gamma_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy} \\ \varepsilon_y = \frac{\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)}{E} \\ \gamma_{yz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{yz} \\ \varepsilon_z = \frac{\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)}{E} \\ \gamma_{xz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xz} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: σ 与 τ 分别为正应力与剪切应力; ε 与 γ 为正应变与剪切应变; μ 为泊松比; E 为杨氏模量。

在 GIL 中,三支柱绝缘子间隔 6 m 排布,因此其承载的平均重力作用为 6 m 长导杆的重力与自身重力,壳体的重力则由外部支撑抵消。由此可确定应力分布仿真模型的边界条件为:壳体下部设定“固定约束”用来模拟管道外部的支撑,壳体外侧压力设置为 0.1 MPa 等效大气压力,内部各处表面则设置 0.5 MPa,用来表示 SF₆ 气体压力的作用,壳体、导体两侧端面为“对称”边界条件,设定套筒与绝缘子、导杆及绝缘子与嵌件等界面为连续性界面,表明相互之间粘接状态良好。

1.2 热应力模型

当固体材料的温度上升时,其结构体积会因此而增加,随着结构体积的增加,固体单元会承受更高水平的应力,这种现象称为热膨胀。采用热膨胀系数来度量固体材料的热膨胀程度

$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad (2)$$

式(2)中: α 为热膨胀系数; L 表示材料原长; ΔL 与 ΔT 分别表示为测量方向上材料试样的长度变化值与实际温度变化量。

由热膨胀引起的热应力为

$$\sigma = \alpha E (T - T_{\text{ref}}) \quad (3)$$

式(3)中: σ 为热应力; T 为材料温度; T_{ref} 为材料体积参考温度^[16]。

在管道输电系统中,由导杆焦耳热损耗与交变电磁场在壳体处产生的涡流损耗通过热传导、热对流、热辐射等传递方式,能够引起管道内部整体温升,设备厂家进行的温升试验结果显示正常状态下导体最大温升不超过 50 °C^[17-19]。温度场方面,设置初始温度与空气温度为 25 °C,设定管道外壳表面为传热学中第三类边界条件,外壳与空气的对流换热系数为 5 W/(m²·K),依据管道内部稳态工况下温度分布情况,采用设置导杆温度为 70 °C 的方法以等效实际温度分布条件。管道整体温度仿真分布情况见图 2,绝缘子中心圆筒处温度最高,为 69.9 °C。模型中材料的温度场仿真参数见表 1,表 1 中 $k(T)$ 、 $\rho(pA, T)$ 分别为软件内置 SF₆ 气体导热系数、密度与温度及压强的函数。

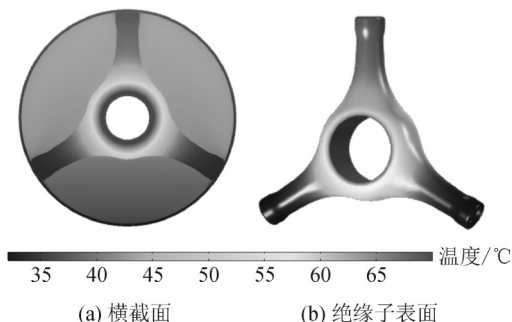


图 2 载流时三支柱绝缘子温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of tri-post spacer

with current loading

表 1 温度场仿真参数表

Table 1 Temperature field simulation parameter table

组件	导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]	热辐射率	密度/ (kg·m ⁻³)
绝缘子	1.035	0.85	2 240
导杆	238.000	0.15	2 700
壳体/套筒	163.000	0.20	2 720
SF ₆	$k(T)$	—	$\rho(pA, T)$

流体场方面,设置边界处无滑移,重力方向沿 y 轴负方向,设置 SF₆ 为可压缩流体。而在模型的两侧端面均设置为对称条件以模拟实际结构的连续性。模型横截面气体流速分布见图 3,管道内气体流速呈现下慢上快的规律,最大流动速度为 0.11 m/s。同时由于绝缘气体流动传热的影响,管道内上部温

度高,下方温度低。绝缘子上支腿处温度高于下侧两支腿,如嵌件附近,上支腿嵌件处温度为 37.4 °C,而下支腿处仅有 32.2 °C。由图 3 可知,绝缘子处的温度梯度,将会影响其热应力的分布情况。

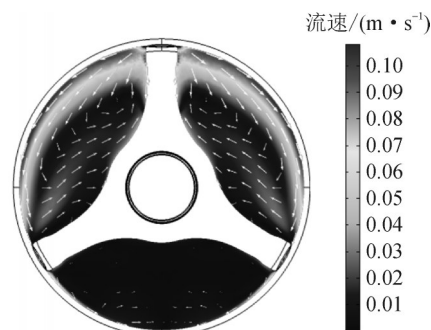


图 3 模型横截面流体场分布图

Fig. 3 Cross-sectional fluid field distribution of the model

1.3 管道振动模型

GIL 处于正常运行状态时,导杆中载流量可达几千 A,其产生的交变电磁场引起管道振动,使得绝缘子应力分布受到影响^[20]。文中从电动力的角度分析管道的振动特性。

某时刻管道轴截面示意图见图 4,在 GIL 轴向截面选取一微元体进行分析,设导杆中电流大小为 $i_1 = I_1 \cdot \cos \omega t$, ω 为电流额定工频角频率;由于 GIL 壳体厚度与其半径相差较大,在研究时可将壳体视作薄壳,且认为薄壳内磁场均匀。

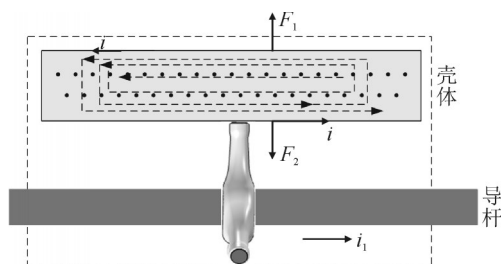


图 4 管道轴截面微元体图

Fig. 4 GIL micro-element diagram at axial section

壳体外部所受电磁力 F_1 为

$$F_1 = B_r i L = \frac{-\omega \mu_0^2 \mu_r^2 S L}{8 \pi^2 R^2 R_{eq}} I_1^2 \sin 2 \omega t \quad (4)$$

同理可以求得壳体内部所受电磁力 F_2 为

$$F_2 = B_r i L = \frac{\mu_0^2 \mu_r^2 S \omega L}{8 \pi^2 R r R_{eq}} I_1^2 \sin 2 \omega t \quad (5)$$

式(4)、(5)中: r 、 R 分别为 GIL 壳体内、外径; R_{eq} 为壳体处等效电阻; μ_0 为真空磁导率; μ_r 为壳体铝合金材料的相对磁导率。综上,每一微元体所受合力为 $F_1 - F_2$,都是以 2 倍工频为基频的简谐力,又由 GIL 的结构对称性,可知管道下部所受电磁力与上部大小相等方向相反。

2 应力分布特点分析

仿真模型中绝缘子、壳体与导杆的机械性能参数见表2。

表2 模型关键组件机械参数

Table 2 Mechanical parameters of key components

组件	杨氏模量/GPa	泊松比	热膨胀系数/ K^{-1}
绝缘子	12.0	0.35	3.5×10^{-5}
壳体	70.3	0.33	2.3×10^{-5}
导杆	70.0	0.33	2.3×10^{-5}

2.1 无负载电流条件下应力分布

无负载电流时三支柱绝缘子主应力分布见图5。主应力是指在物体内部切应力为零的主平面上的正应力,按数值大小依次称为第1、第2、第3主应力。正的第1主应力为拉应力,负的第3主应力为压应力。重力作用方向设置为竖直向下,可以看出三支柱绝缘子最大拉应力集中在下方两支腿的下侧,达2.37 MPa;最大压应力位于下支腿与嵌件粘接边缘,为9.02 MPa,此外 SF_6 气压使绝缘子表面整体呈现出受压的状态,数值接近于0.5 MPa。

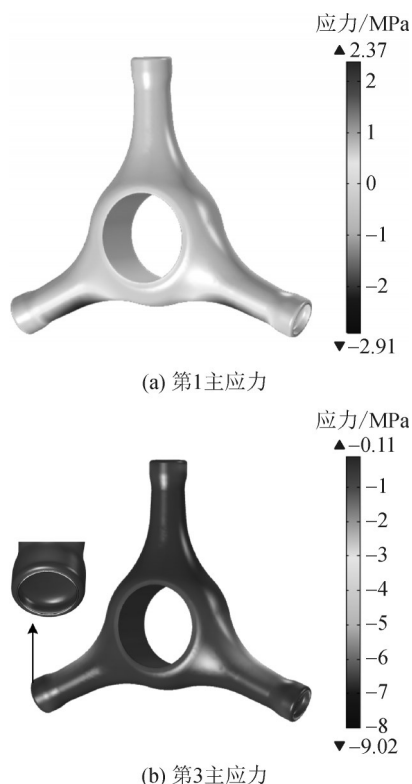


图5 重力作用下三支柱绝缘子主应力分布

Fig. 5 Principal stress distribution of tri-post spacer under gravity

2.2 额定工况下应力分布

除了重力与气压的作用外,热膨胀与管道振动也是影响额定工况下三支柱绝缘子的应力分布情

况的两个重要因素。考虑热膨胀作用下的仿真结果见图6。此时热膨胀产生的影响使绝缘子支腿底部与绝缘子腹部位置的第1主应力较为集中,且最大值增加了3.60倍达10.9 MPa;与其温度场分布特点类似,腹部也是绝缘子温度最高的位置;而压应力方面,由于环氧—套筒界面处温升最大,二者受热膨胀产生相互挤压作用,观察此时第3主应力分布图可知,压应力最集中的部位为绝缘子与套筒连接处边缘位置,最大值为64.1 MPa。与装置未投入运行时仅有重力作用的仿真结果进行对比可知,热膨胀产生的作用力使拉应力与压应力最大值显著提升,表明其对绝缘子的应力分布情况影响更大。

三支柱绝缘子与嵌件粘接部位是典型的薄弱位置,因此需要重点关注其边缘处应力分布。导体温升在此处产生的影响主要体现为压应力的增大,见图7。压应力随着距中心截面距离的减小而逐渐增大,结合温度场分布特点可知,上支腿处温度高于下支腿,因此其受热膨胀的影响更大,上支腿/嵌件边界处压应力显著大于下侧两支腿处,达到22.5 MPa。由于GIL结构的对称性,其下侧两支腿相应边界处压应力分布规律十分相似。

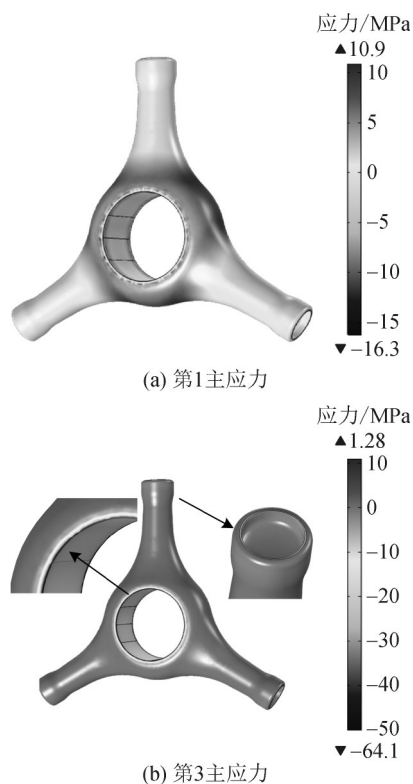


图6 热膨胀作用下三支柱绝缘子主应力分布

Fig. 6 Principal stress distribution of tri-post spacer under thermal expansion

考虑振动影响时额定工况下三支柱绝缘子应

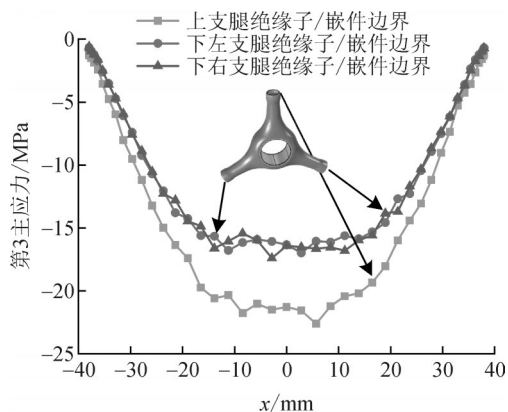


图7 热膨胀对绝缘子/嵌件边界第3主应力分布影响

Fig. 7 Effect of thermal expansion on distribution of the third principal stress at spacer/insert boundary

力仿真结果图见图8。在正常工作状态时, GIL的振动信号主要分布在0~1 000 Hz频率范围内, 而管道在100 Hz即2倍工频时的振动信号最为强烈, 其他频率处幅值极小。因此求解稳态工况后在仿真设置时忽略其他高次谐波分量的影响, 结合理论分析与实际管道振动试验测试结果, 添加设置壳体为加速度幅值 0.013 m/s^2 、频率为100 Hz的振动方式^[21]。由图8可知, 在额定工况的正常运行振动情况下, 管道的运动通过嵌件作用于绝缘子使其下侧两支腿产生更大的应变, 而下支腿边界处出现了较明显的拉应力集中, 幅值增加到16.6 MPa。因此, GIL正常振动对于三支柱绝缘子拉应力幅值与分布情况的影响较大。

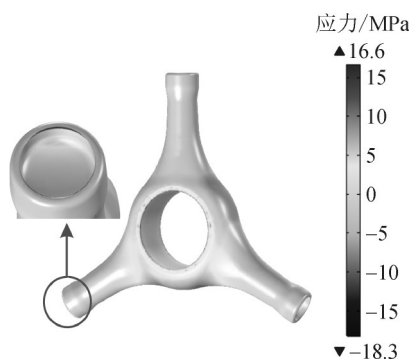


图8 额定工况下三支柱绝缘子第1主应力分布

Fig. 8 The first principal stress distribution of tri-post spacer under the rated conditions

2.3 导杆偏转与最大允许温升下应力分布

GIL在实际装配中可能会因装配误差而出现导杆偏转的情况^[22-27]。因此在额定工况的基础上考虑导杆沿y轴正方向存在偏心误差的情况, 偏差位移方向与应力仿真结果见图9, 此时绝缘子的拉应力集中部位并未发生改变, 仍位于下侧两支腿/嵌件边界处, 但由于偏心力的影响, 下右支腿边界处拉应

力幅值减小, 下左支腿相应位置幅值增大, 达到20.9 MPa。因此对于GIL设备, 出现装配偏差对于系统可靠性具有较大影响。

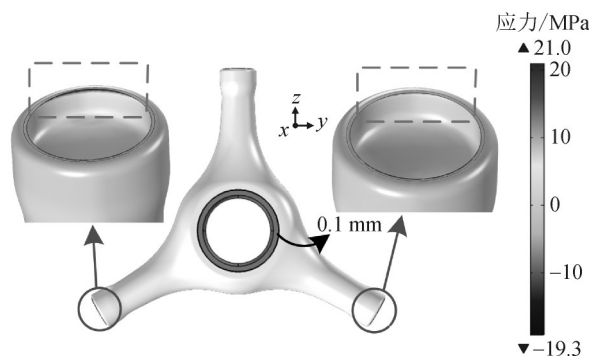


图9 导杆偏转时三支柱绝缘子第1主应力分布

Fig. 9 The First principal stress distribution of tri-post spacer under conductor deviation

考虑到热膨胀作用对绝缘子应力分布的影响最大, 文中结合国标要求, 计算了导杆最大允许温升时的三支柱绝缘子应力分布情况进行校验。根据《DL/T 978—2018》, 在环境温度不超过40℃时铝合金导杆最大允许温升为65℃, 仍考虑环境温度为25℃时的情况, 则此时导杆最高允许工作温度为90℃^[28-29]。对比仿真结果, 在导杆最高允许运行温度情况下绝缘子应力集中位置及温度分布情况与额定工况下的特点一致, 仅存在幅值上的差距, 结果对比见表3。

表3 不同导杆温度下仿真结果对比

Table 3 Comparison of simulation results with different conductor temperature

工作环境	拉应力最大值/ MPa	压应力最大值/ MPa	上支腿嵌件温 度/℃
额定工况	16.6	69.9	37.4
最高温度	19.6	100.3	44.3

3 结论

文中针对1 100 kV GIL中固定三支柱绝缘子的应力分布进行了系统地分析, 得到主要结论如下:

1) 未投入运行时, 考虑重力和绝缘气体气压作用, 三支柱绝缘子的拉应力集中在下方两支腿与腹部相交的位置, 压应力集中在下支腿/嵌件边界处, 二者最大值分别为2.37 MPa与9.02 MPa。

2) 在额定工况下, 对三支柱绝缘子应力分布产生影响的因素有重力、温升引起的热膨胀、管道电磁振动。其中热膨胀是最主要的影响因素, 其对压应力幅值影响更为显著。热膨胀使得绝缘子拉应力集中部位变为绝缘子腹部, 压应力集中部位为套

筒/绝缘子边界处,最大值分别增大360%与611%,达到10.9 MPa与64.1 MPa。

3)GIL中可能出现装配偏差与短时温升的情况。考虑由装配误差引起的导杆偏转时,绝缘子拉应力最大值达21 MPa,出现在与偏差方向相反的支腿边界处,而压应力值增幅很小;导杆最大温升不改变应力分布特点,与额定工况相比仅有幅值分别提升17.4%与43.5%,达到19.6 MPa与100.3 MPa。

参考文献:

- [1] 李 进,梁虎成,杜伯学. 气体绝缘直流设备气固界面电场分布特性与调控方法研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2619-2628.
LI Jin, LIANG Hucheng, DU Boxue. Progress in electrical field distribution along gas-solid interface in compact gas insulated system and its regulation methods[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2619-2628.
- [2] 梁虎成,杜伯学,陈 允,等. 基于迭代算法的功能梯度绝缘子介电常数分布优化[J]. 电工技术学报, 2020, 35(17): 3758-3764.
LIANG Hucheng, DU Boxue, CHEN Yun, et al. Permittivity distribution optimization of functionally graded insulator based on iterative method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(17): 3758-3764.
- [3] 李 进,王雨帆,梁虎成,等. 高压直流GIL盆式绝缘子非线性电导参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 166-173.
LI Jin, WANG Yufan, LIANG Hucheng, et al. Parameter optimization of nonlinear conductivity spacer for HVDC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 166-173.
- [4] LI Jin, LIANG Hucheng, CHEN Yun, et al. Promising functional graded materials for compact gaseous insulated switchgears/pipe-lines[J]. High Voltage, 2020, 5(3): 231-240.
- [5] 李永飞,姜映焯,郝留成,等. 1 100 kV GIS盆式绝缘子气泡缺陷下的有限元应力分析[J]. 绝缘材料, 2020, 53(7): 57-61.
LI Yongfei, JIANG Yingye, HAO Liucheng, et al. Finite element stress analysis on 1 100 kV GIS basin insulators with bubble defects[J]. Insulating Materials, 2020, 53(7): 57-61.
- [6] GUO Zihao, WU Zehua, WANG Haoran, 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.
- [7] 贾云飞,高 璐,汲胜昌,等. 1 100 kV气体绝缘金属封闭输电线路用三支柱绝缘子电气性能优化[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(7): 168-179.
JIA Yunfei, GAO Lu, JI Shengchang, et al. Electrical performance optimization for tri-post insulator on 1 100 kV gas-insulated metal-enclosed transmission line[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(7): 168-179.
- [8] 高 璐,贾云飞,汲胜昌,等. 环保型1 100 kV 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 1 100 kV GIL[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 987-995.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 郭子豪,王浩然,李 禾,等. 特高压盆式绝缘子水压试验中应力应变分布的仿真计算与光纤测量[J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 993-1002.
GUO Zihao, WANG Haoran, LI He, et al. Calculation and experimental study on strain and stress distribution of UHV GIS spacer during hydrostatic test[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 993-1002.
- [12] 陈 允,崔博源,王宁华,等. 1 100 kV气体绝缘开关设备用盆式绝缘子中心嵌件结构设计[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 564-570.
CHEN Yun, CUI Boyuan, WANG Ninghua, et al. Structural design of central insert in basin-type insulator used for 1 100 kV GIS [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2): 564-570.
- [13] LIANG Hucheng, DU Boxue, LI Jin, et al. Mechanical stress distribution and risk assessment of 1 100 kV GIS insulator considering Al₂O₃ settlement[J]. High Voltage, 2019, 4(1): 65-71.
- [14] 李 进,张 程,杜伯学,等. 直流GIL用非线性电导环氧绝缘子电场仿真[J]. 高电压技术, 2019, 45(4): 1056-1063.
LI Jin, ZHANG Cheng, DU Boxue, et al. Electrical field simulation of epoxy spacer with nonlinear conductivity for DC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1056-1063.
- [15] 刘鸿文. 简明材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997: 254.
LIU Hongwen. Mechanics of materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 1997: 254.
- [16] 郑莉芳,谢亚杰,岳丽娜,等. 不同剂量 γ 辐照对玻璃纤维/环氧树脂热性能的影响[J]. 复合材料学报, 2017, 34(11): 2407-2413.
ZHENG Lifang, XIE Yajie, YUE Lina, et al. Effects of different γ irradiation dosages on thermal properties of glass fiber/epoxy resin composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(11): 2407-2413.
- [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] 李 冰,肖登明,赵 谔,等. 第二代气体绝缘输电线路的温升数值计算[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 271-276.
LI Bing, XIAO Dengming, ZHAO Su, et al. Temperature rise numerical calculation of the second generation gas insulated trans-

- sion line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(13):271-276.
- [19] 张俊民, 高荟凯, 冯昊. 三种绝缘气体下开关设备的温度场及流场对比与分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6):155-161.
- ZHANG Junmin, GAO Huikai, FENG Hao. Analysis of thermal and fluid field of switchgear in three insulating gases[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6):155-161.
- [20] 刘媛, 杨景刚, 贾勇勇, 等. 基于振动原理的GIS隔离开关触头接触状态检测技术[J]. 高电压技术, 2019, 45(5):1591-1599.
- LIU Yuan, YANG Jinggang, JIA Yongyong, et al. Connection state diagnosis method of GIS disconnecter based on mechanical vibration[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5):1591-1599.
- [21] 蒋龙, 臧春艳, 胡学深, 等. 基于低频振动信号的GIL机械故障诊断[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3):86-91.
- JIANG Long, ZANG Chunyan, HU Xueshen, et al. Research on the diagnosis of GIL mechanical fault by low frequency vibration signal[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3):86-91.
- [22] 汪建成, 谢文刚, 宫瑞磊, 等. 550 kV GIL三支柱绝缘子设计[J]. 高压电器, 2018, 54(5):114-118.
- WANG Jiancheng, XIE Wengang, GONG Ruilei, et al. Design of 550 kV GIL three post insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5):114-118.
- [23] 王井飞, 张强, 李祥斌, 等. 特高压直流输电工程GIL三支柱绝缘子故障分析及改进措施[J]. 高压电器, 2020, 56(1):246-252.
- WANG Jingfei, ZHANG Qiang, LI Xiangbin, et al. Fault analysis and improvement measures of GIL three - pillar insulator in UHVDC transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1):246-252.
- [24] 徐长福, 赵新冬, 梁伟, 等. 基于数字孪生技术的GIL综合管廊气体泄漏与排除全过程风险性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3):160-171.
- XU Changfu, ZHAO Xindong, LIANG Wei, et al. Risk assessment of gas leakage and elimination in GIL utility tunnels based on digital twin technology[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3):160-171.
- [25] 耿秋钰, 胡智莹, 李庆民, 等. 特高压交流GIS/GIL拔孔型陷阱优化设计与协同布置方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(23):6539-6552.
- GENG Qiuyu, HU Zhiying, LI Qingmin, et al. Optimal design and synergism arrangement methodology of convex - shaped traps for ultra high voltage AC GIS/GIL applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(23):6539-6552.
- [26] 胡智莹, 耿秋钰, 魏来, 等. 直流GIS/GIL中驱赶电极与微粒陷阱的协同抑制作用及优化设计方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(12):3338-3349.
- HU Zhiying, GENG Qiuyu, WEI Lai, et al. Synergistic inhibitory effect and optimal design method of driving electrode and particle trap in DC GIS/GIL[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(12):3338-3349.
- [27] 杜伯学, 董佳楠, 梁虎成. 特高压GIL非均匀热气流特性与三支柱绝缘子绝缘裕度分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6):1678-1686.
- DU Boxue, DONG Jianan, LIANG Hucheng. Non-uniform gas convection in UHV-GIL and insulation margin analysis for tri-post insulator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6):1678-1686.
- [28] 气体绝缘金属封闭输电线路技术条件:DL/T 978—2018[S]. 2018. Specification for gas-insulated metal enclosed transmission line: DL/T 978—2018[S]. 2018.
- [29] 刘庆潭. 材料力学教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2006:189.
- LIU Qingtan. Mechanics of materials[M]. Beijing: China Machine Press, 2006:189.

王亚祥(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向环氧树脂绝缘件工艺与配方优化。

刘松涛(1998—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向环氧树脂绝缘件应力分布与强度失效分析。

李进(1988—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为大容量电缆与气体绝缘输气管道绝缘设计与缺陷检测(通信作者)(E-mail: lijn@tju.edu.cn)。

(上接第76页)

- ZHU Siyao. Study of electrical contact and temperature rise characteristics for GIL connection contact[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [29] 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.
- [30] 张鑫, 王艺桦, 郑王里, 等. 高压隔离开关温差发电特性的仿真与实验[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(5):1914-1920.
- ZHANG Xin, WANG Yihua, ZHENG Wangli, et al. Simulation and experiment on thermoelectric characteristics of high voltage disconnecter[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(5):1914-1920.
- [31] 龚泽威一, 曹占国, 周帅, 等. 基于过采样和随机森林的高压隔离开关发热故障诊断[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(11):72-79.
- GONG Zewei, CAO Zhanguo, ZHOU Shuai, et al. The thermal fault detection of high voltage disconnectors based on oversampling and random forest[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(11):72-79.
- [32] 耿秋钰, 胡智莹, 李庆民, 等. 特高压交流GIS/GIL拔孔型陷阱优化设计与协同布置方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(23):6539-6552.
- GENG Qiuyu, HU Zhiying, LI Qingmin, et al. Optimal design and synergism arrangement methodology of convex - shaped traps for ultra high voltage AC GIS/GIL applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(23):6539-6552.
- 范艳艳(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为高压开关器件性能提升技术研究(E-mail:fanyanyan01@163.com)。
- 张彦敏(1970—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为高性能铜合金先进成型及优化技术(通信作者)(E-mail: zhangmin70@163.com)。