

极端温度骤变条件下GIS盆式绝缘子温度-应力耦合仿真研究

马笛琴,陈 田,周求宽,李阳林,胡睿智

(国网江西省电力有限公司电力科学研究院,江西 南昌 330096)

摘 要:为评估GIS盆式绝缘子在极端温度骤变条件下的结构可靠性,文中基于有限元方法,对550 kV盆式绝缘子冷热冲击过程进行仿真分析。研究分别考察了冷冲击(98℃→2℃)与热冲击(2℃→98℃)两种工况,系统解析温度场时空演化、水体自然对流特征及环氧树脂盆体的热应力分布规律。在冷冲击条件下,最大应力为47.9 MPa,出现在初始阶段,位于中心嵌件与环氧树脂交界面;热冲击条件下,最大应力为100.5 MPa,盆式绝缘子曲率突变部位存在应力明显集中的现象,设计中应避免采用过小的过渡圆角。对比发现,热冲击对盆式绝缘子施加温度梯度及应力水平的条件较冷冲击更为严苛,热冲击下环氧树脂温度变化速率慢于冷冲击,且前者产生的热应力高于后者。

关键词:盆式绝缘子;冷热冲击;热应力

中图分类号:TM 216 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2026)03-0001-06

0 引言

盆式绝缘子作为气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)的核心部件,起着支撑导体、隔离气室以及电气绝缘的关键作用,其运行可靠性直接决定了整个输变电系统的安全与稳定^[1]。但在实际服役过程中,盆式绝缘子并非处于恒定的环境温度中,而是长期承受由于导体通流发热、环境温度波动以及突发短路故障等因素引起的剧烈温度波动^[2-3],这种温度的交变与骤变,会在绝缘子内部产生显著的热应力梯度。盆式绝缘子通常由环氧树脂复合材料与金属附件(中心嵌件、法兰)一体浇注成型,二者热膨胀系数存在差异,冷热交替过程中界面易因热失配产生累积性热机械疲劳损伤^[4]。

冷热冲击试验是模拟上述极端工况的加速方法,通过将盆式绝缘子反复置于高温与低温急剧交替的环境中,考核其结构完整性和界面粘结性能。在冷热冲击试验中,盆式绝缘子与水热量交换,导致内部温度不

均,各部位膨胀收缩不一致,产生局部应力。冷热冲击分为冷冲击和热冲击,冷冲击是将处于高温状态的盆式绝缘子浸入冷水中,热冲击则是将处于低温状态盆式绝缘子浸入热水中。若生产工艺存在问题,盆式绝缘子内部含有气隙、微裂纹等缺陷,则冷热冲击可能诱发裂纹生长、界面剥离甚至整体开裂等不可逆损伤,进而导致局部放电乃至绝缘击穿事故^[5-6]。因此,开展冷热冲击条件下,盆式绝缘子的多物理场仿真分析,揭示其温度分布、流体对流及热应力演化规律,对优化盆式绝缘子及提升其运行可靠性具有重要意义。

1 多物理场耦合模型

1.1 几何模型

文中基于COMSOL Multiphysics®有限元方法,将550 kV GIS用盆式绝缘子作为研究对象。如图1所示,将盆式绝缘子置于圆柱形水箱中,盆式绝缘子和水箱均为中心轴对称结构,将模型简化为二维轴对称模型。在保证计算精度、准确的前提下,为提高运算效率,文中进行了多处

收稿日期:2026-04-10

基金项目:国网公司总部科技项目(52182025001P)。

作者简介:马笛琴(1998),女,硕士,助理工程师,从事复合绝缘材料检测及绝缘件多物理场仿真研究。

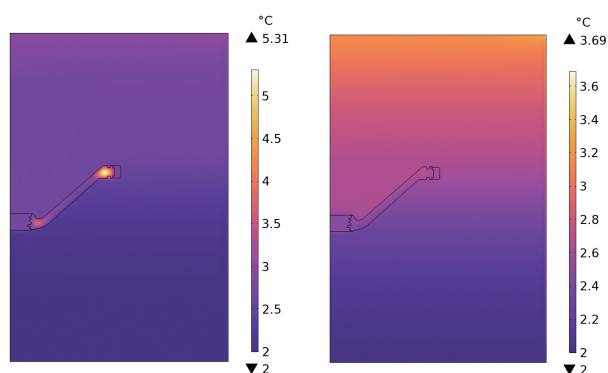
(e) $t=30\text{ min}$ (f) $t=60\text{ min}$

图2 冷冲击试验过程中盆式绝缘子及水体温度变化

监测盆式绝缘子环氧树脂底部和凹槽处最高温度点随时间的变化情况,结果如图3所示。可见温度下降呈指数衰减趋势,前10 min内温度下降最快,之后逐渐平缓,27 min后与初始水温温差小于3℃,盆式绝缘子内部温度基本均匀分布。

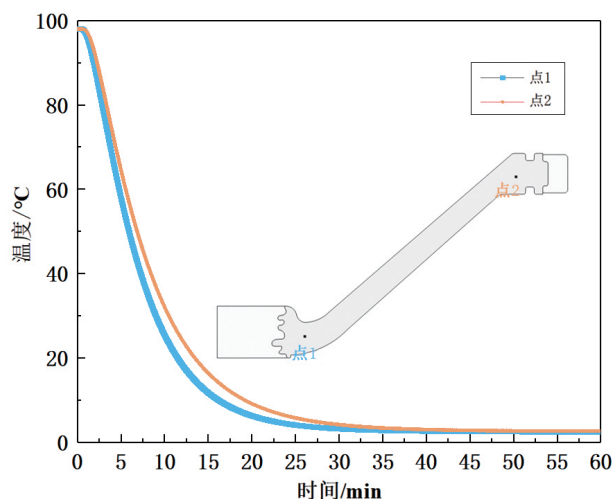


图3 冷冲击试验盆式绝缘子内部点温度随时间变化规律

根据 T/CEC 944—2024 中 6.5.1 规定,绝缘子浸没平均水温变化不超过2℃。图4展示了从盆式绝缘子浸没至整个冷冲击试验过程中平均水温变化情况,平均水温如下:

$$\bar{T} = \frac{\int T dA}{A} \quad (4)$$

式中: $\bar{T}$ 为水体平均温度; T 为各部位水体温度; A 为水体面积。平均水温变化 ΔT 如下:

$$\Delta T = \bar{T} - \bar{T}_0 \quad (5)$$

式中: $\bar{T}_0$ 为初始平均水温。水温随着试验时间增加先快速上升后逐渐平缓,最高温升0.47℃,水温上升幅度不超过2℃,满足试验标准要求。

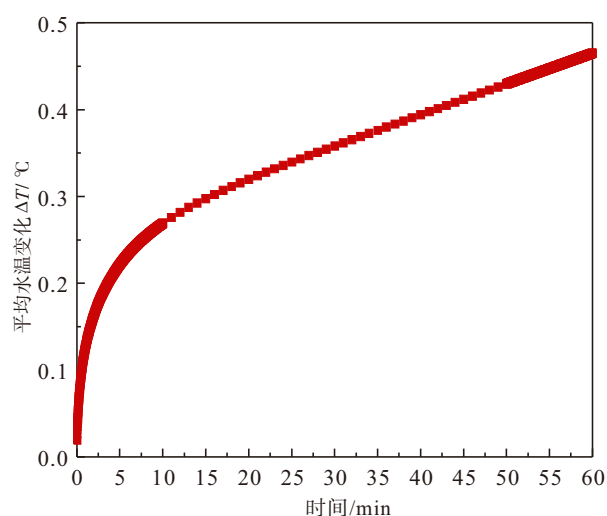


图4 冷冲击试验平均水温变化

2.2 冷冲击试验水流速分布

盆式绝缘子与冷水发生热量交换,金属嵌件及法兰部位热流密度大,附近水体升温较快。加热后的水密度减小,在浮力作用下向上运动,形成自然对流环流。图5显示了 $t=20\text{ s}$ 和 $t=120\text{ s}$ 时的水流速分布。初始阶段流速较大,集中在金属表面附近,最大流速达到5.98 cm/s;随着温差减小,流速逐渐降低。

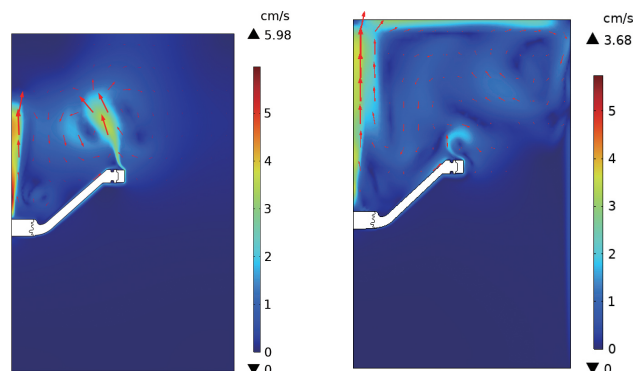
(a) $t=20\text{ s}$ (b) $t=120\text{ s}$

图5 冷冲击试验水流速分布

2.3 冷冲击试验盆体应力分布

环氧树脂为脆性材料,文中采用第一强度理论评估环氧树脂破坏风险,主要考虑材料拉伸强度。如图6所示,刚浸入水中时,盆式绝缘子盆体内部应力最大,且集中在盆体与中心嵌件的交接面上,最大应力达到47.9 MPa,这是因为金属嵌件快速收缩,对环氧树脂产生强烈的径向拉应力。随着温度趋于均匀,热应力逐渐释放,60 min后最大主应力降至约15 MPa左右。

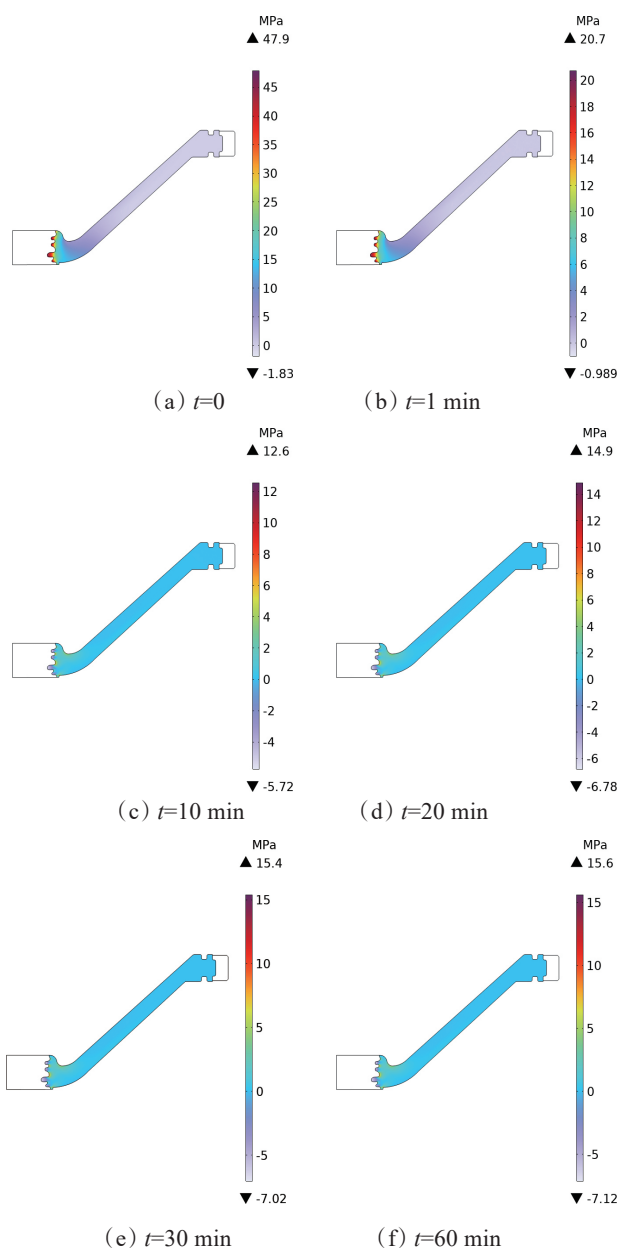


图6 冷冲击试验盆体应力分布

在冷冲击工况下,最大热应力 47.9 MPa, 低于环氧树脂的典型抗拉强度 65 MPa^[8], 表明该结构盆式绝缘子在冷冲击下具有足够的安全裕度。

3 盆式绝缘子热冲击试验

3.1 热冲击试验盆式绝缘子及水体温度分布

将 2 °C 的盆式绝缘子放入 98 °C 水中, 浸泡 60 min。如图 7 所示, 热冲击过程中, 金属嵌件及法兰因导热系数高而快速升温, 盆体环氧树脂升温较慢。初始 1 min 内, 金属表面温度已升至约 50 °C, 而盆体远端仍接近

2 °C, 形成巨大的瞬态温度梯度, 60 min 后整体温度趋于 98 °C ; 10 ~ 30 min 后, 中心嵌件附近上方热水与盆式绝缘子换热后温度降低, 在重力作用下往下流动, 但由于盆式绝缘子的阻挡, 而堆积在盆式绝缘子上方。

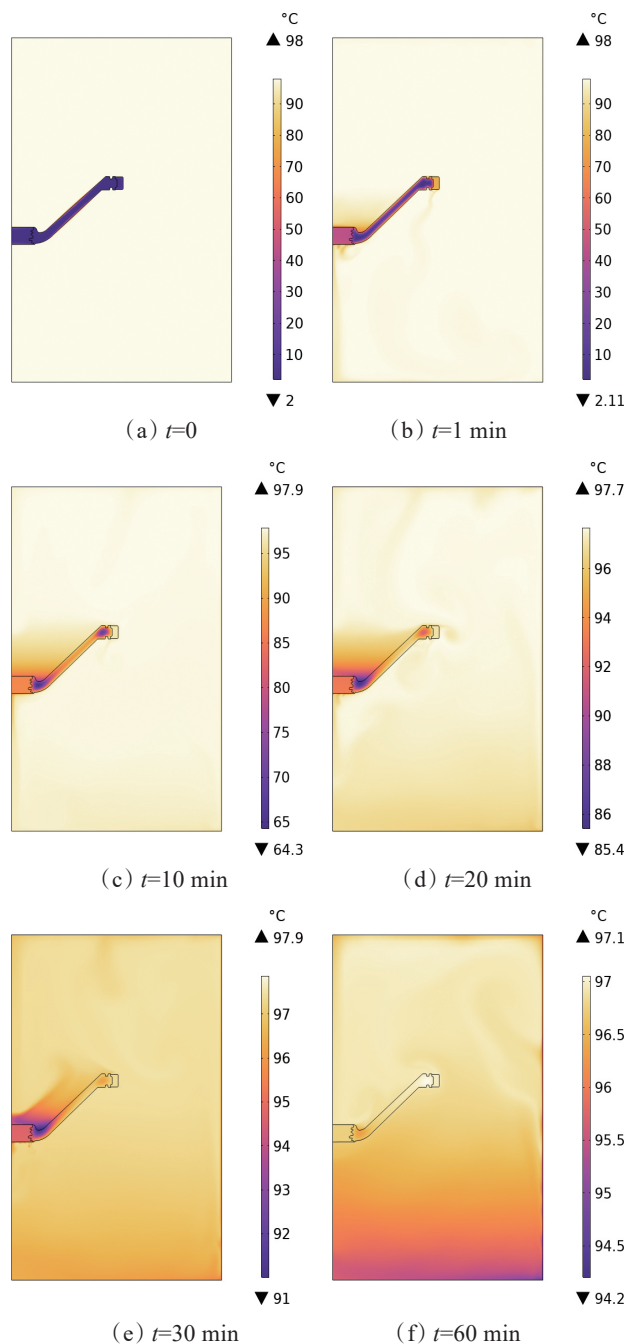


图7 热冲击试验过程中盆式绝缘子及水体温度变化

监测盆式绝缘子环氧树脂底部和凹槽处最低温度点随时间的变化, 结果如图 8 所示。前 10 min 内温度上升最快, 之后逐渐平缓, 44 min 后与水温差小于 3 °C, 盆式绝缘子内部温度基本均匀分布。

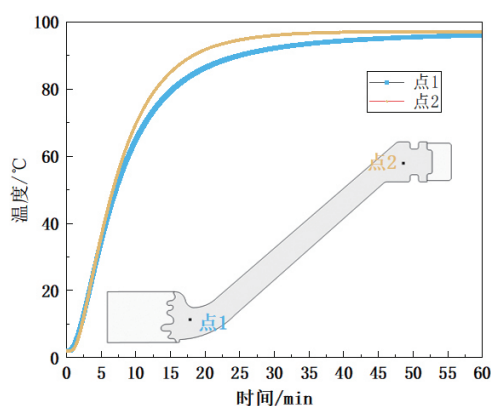


图8 热冲击试验盆式绝缘子内部点温度随时间变化规律

图9展示了整个热冲击试验过程中平均水温的变化,水温下降幅度同样控制在 2°C 以内,符合试验要求。

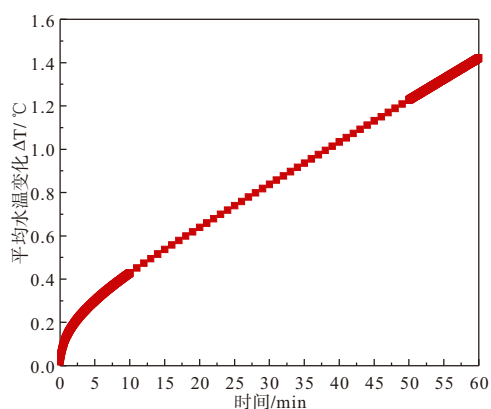


图9 热冲击试验平均水温变化

3.2 热冲击试验水流速分布

在热冲击下,热水与低温盆式绝缘子接触,金属表面附近水体迅速冷却,密度增大而下沉,形成向下的自然对流。图10显示 $t=20\text{ s}$ 时,金属嵌件周围出现明显的下降流,流速峰值约 0.08 m/s ; $t=120\text{ s}$ 后对流减弱。

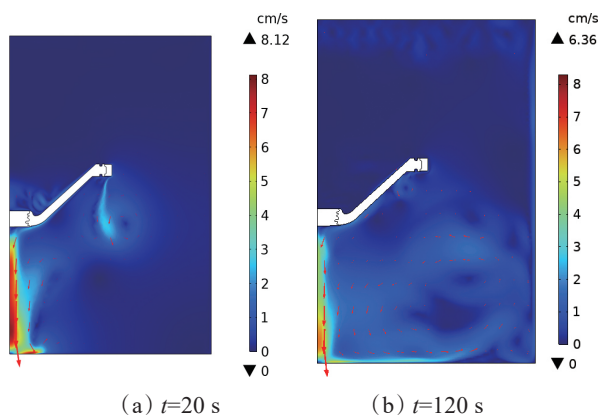


图10 热冲击试验水流速分布

3.3 热冲击试验盆体应力分布

盆式绝缘子与金属嵌件点接触部位会产生应力

集中现象,该处计算应力远超材料实际强度,属于数值奇异,需予以排除。盆式绝缘子环氧树脂内部的第一主应力分布如图11所示,初始时刻($t=0$),由于金属嵌件快速膨胀,盆体与嵌件交界处承受较大拉应力;随时间推移,热应力先增大后减小。监测整个试验过程中交界面上应力最大点的应力变化情况,如图12所示,在 19.1 s 时达到最小值 1.25 MPa ,此时该点温度 23.4°C 接近设定的环境温度 20°C , 60 min 时,达到峰值 58 MPa 。环氧树脂最大应力出现在盆式绝缘子凸面与嵌件衔接的拐角处,如图11(c)~(f)所示, 60 min 时,应力最大达到 100.5 MPa ,远大于环氧树脂许用强度,该盆式绝缘子结构设计存在不合理之处。

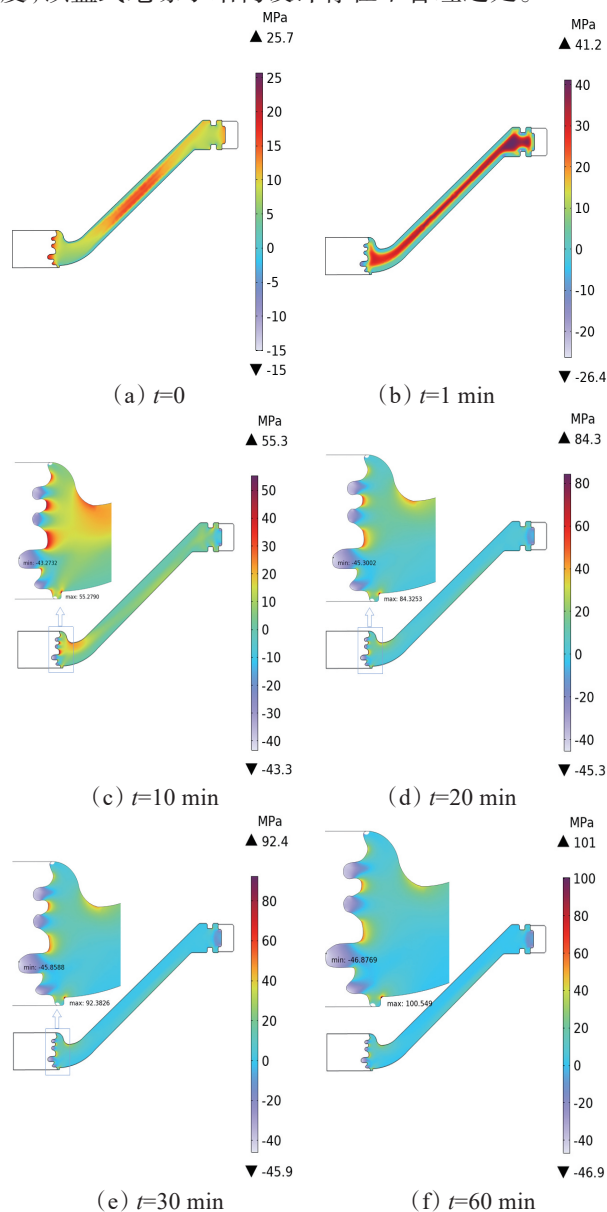
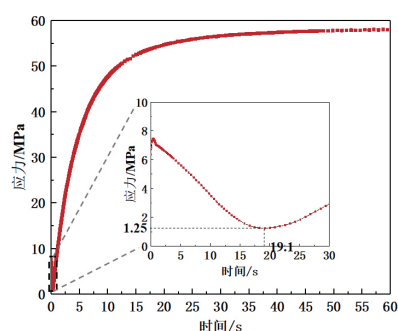
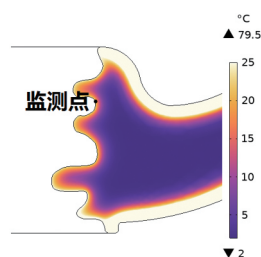


图11 热冲击试验盆体应力分布



(a) 试验过程中监测点应力变化



(b) $t=19.1$ s 监测点温度

图12 热冲击试验过程嵌件与盆体交界面上应力最大点应力变化

图13给出了60 min后,排除大曲率部位的应力分布情况,最大应力为58 MPa,低于环氧树脂的强度极限,满足设计要求。但值得注意的是,应力集中区域主要位于结构曲率变化较大的部位(如凹槽过渡圆角处),因此,在盆式绝缘子的结构设计初期应避免过小的曲率半径,以降低应力集中风险。

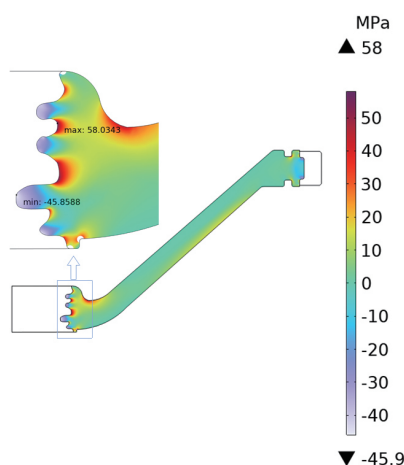


图13 热冲击60 min去除大曲率部位盆式绝缘子应力分布

4 结语

文中基于有限元方法,对550 kV GIS盆式绝缘子在冷热冲击试验过程中的温度-应力多物理场行为进行了仿真分析,得出以下结论:

1) 在冷冲击工况($98\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 2\text{ }^{\circ}\text{C}$)下,盆式绝缘子浸入冷水后表面温度迅速下降。27 min后,内部与水温差小于 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度分布趋于均匀。初始阶段,盆式绝缘子金属嵌件因导热系数高而快速降温,与环氧树脂盆体之间产生瞬态温度梯度,导致交界面处产生最大第一主应力47.9 MPa,该应力值低于环氧树脂的许用强度,满足设计要求。

2) 在热冲击工况($2\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 98\text{ }^{\circ}\text{C}$)下,金属嵌件因导热系数高而快速升温。44 min后,内部与水温差小于 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。初始阶段金属嵌件快速膨胀,在交界面处产生显著热应力,排除数值奇异点后,试验进行至60 min时,盆式绝缘子凸面与中心嵌件衔接的拐角达到应力峰值100.5 MPa,超出环氧树脂许用强度。排除大曲率部位,最大应力为58.0 MPa,分布在环氧树脂与中心嵌件交界面处。

3) 盆式绝缘子的曲率突变部位(如凹槽过渡圆角)易产生应力集中现象,设计初期应避免大曲率结构,建议采用较大的过渡圆角半径,以降低热冲击下的峰值应力。

4) 热冲击对盆式绝缘子的温度梯度与应力水平的要求均高于冷冲击,是更为严苛的考核工况。

参考文献:

- [1] 张施令,彭宗仁,刘鹏,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.
- [2] 阮智玮,阚超豪,王垒.盆式绝缘子温度场仿真分析[J].电气自动化,2019,41(03):20-25.
- [3] 王增彬,刘姝嫔,周宏扬,等. GIS盆式绝缘子温度多物理场仿真方法[J].高电压技术,2019,45(12):3820-3826.
- [4] 杨锐,袁端鹏,郝留成,等.盆式绝缘子的热应力分析[J].高压电器,2025,61(06):113-119.
- [5] 高晋文,叶严军,于卓琦,等.含有裂纹缺陷的GIS盆式绝缘子的静力特性及其影响因素分析[J].高压电器,2020,56(12):251-256.
- [6] 何伟明. GIS盆式绝缘子界面缺陷与热应力超声检测方法研究[D].广州:华南理工大学,2021.
- [7] 中国电力企业联合会.气体绝缘金属封闭开关设备用支持绝缘子技术要求:T/CEC 944—2024[S].北京:中国电力出版社,2024.
- [8] 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(03):993-1002.