

220 kV 盆式绝缘子异常受力有限元仿真分析

马笛琴,胡睿智,陈 田,徐碧川,刘方吉

(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:气体绝缘封闭开关设备(gas insulated switchgears, GIS)用盆式绝缘子开裂是导致SF₆气体泄露的主要因素,严重影响电力系统的安全运行。安装、运输及运行过程中产生的异常外力是引发盆式绝缘子开裂的关键原因。文中通过有限元仿真220 kV GIS用盆式绝缘子各种异常受力行为,经研究发现,凹面侧气体压力使密封圈凹槽处出现应力集中,建议设计时增强该处机械强度;凸面侧轴向承压能力优于凹面侧,安装中应避免凹面侧碰撞;弯矩作用下凸面过渡区与凹面槽口处易应力集中,长母线安装需严格对中以防持续受弯。结果表明,设计上强化凹槽口强度、安装中应严格对中并避免碰撞是提升盆式绝缘子机械可靠性的关键。

关键词:盆式绝缘子;异常受力;有限元仿真;应力

中图分类号:TM 216 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2025)05-0008-04

0 引言

盆式绝缘子广泛应用于气体绝缘封闭开关设备(gas insulated switchgears, GIS),起到支撑母线及分隔气室的作用,其性能影响GIS可靠运行。盆式绝缘子开裂是SF₆气体泄露主要原因之一,SF₆气体泄露导致GIS的绝缘性能下降,造成停电事故,严重影响电力系统的安全运行。

国内对盆式绝缘子研究主要集中在盆体几何结构设计及优化^[1-2]、电场优化^[3-4]、盆体内部缺陷^[5-6]等方面,而对其机械强度方面的研究较少。近年来发生多起盆式绝缘子开裂故障,机械损伤是主要原因之一^[7-8]。机械强度主要研究压力强度在整个盆体上的作用^[9-11],即水压或者气压作用下盆式绝缘子应力分布。盆式绝缘子除了在运行过程中受到气体压力作用外,在生产、运输、安装、检修等过程中,受到碰撞、冲击等局部机械力作用,也会在其内部产生微裂纹甚至开裂。因此,对盆式绝缘子异常受力分析具有重要意义。

文中针对盆式绝缘子各种可能的受力情况,分析了应力集中的薄弱点,包含螺栓紧固不均匀、单侧受压、轴向力及弯矩过大,提出改进措施,为优化盆式绝缘子结构设计提供参考依据。

1 盆式绝缘子几何模型构建与参数设置

1.1 盆式绝缘子几何模型构建

江西某220 kV变电站GIS发生一起SF₆气体泄漏事件,现场拆卸GIS后发现过渡气室连接的盆式绝缘子发生开裂。分析发现,在现场安装过程中,盆式绝缘子受到冲击力作用,造成内部产生缺陷,在连续运行2个月 after 发生开裂。

根据其厂家提供的图纸,构建220 kV盆式绝缘子几何模型,如图1所示。盆式绝缘子由铝制中心嵌件、掺杂Al₂O₃环氧树脂复合材料及外圈铝制金属法兰组成。在浇筑过程中,环氧复合材料与中心嵌件通过胶水粘接并进行固化,界面物理量保持连续,而外圈金属法兰喷涂脱模剂,环氧复合材料与金属法兰表面可以相互滑动。故有限元仿真时,中心嵌件与盆体采用一致对,金属法兰与盆体则采用接触对。

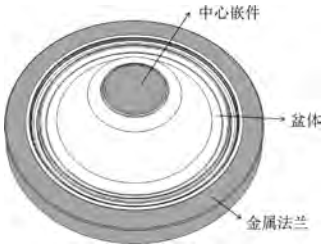


图1 盆式绝缘子几何结构

收稿日期:2025-03-12

作者简介:马笛琴(1998),女,硕士,助理工程师,从事绝缘件与绝缘材料性能检测与仿真分析。

1.2 盆式绝缘子材料参数设置

仿真材料参数设置如表1所示,环氧树脂复合材料参数来源于文献[11]拉伸试验结果。环氧复合材料为脆性材料,采用第一强度理论判断盆式绝缘子的强度,即当第一主应力大于材料的抗拉强度(65 MPa)时,发生破坏^[12],而当中心嵌件与盆体界面第一主应力大于粘接应力40 MPa,认为界面出现破坏。

表1 材料参数设置

材料	密度/(g·cm ⁻³)	杨氏模量/GPa	泊松比
环氧树脂复合材料	2.233	13	0.36
铝	2.7	70	0.33

2 盆式绝缘子异常受力应力仿真

2.1 螺栓紧固不均匀导致盆式绝缘子受力

盆式绝缘子安装过程中,凹槽处放入密封圈,通过紧固法兰上的螺栓将盆式绝缘子压紧。其两侧凹槽受到密封圈压力作用,此压力来源于螺栓预紧力 P ,计算公式如下:

$$P = \frac{M}{kd} \quad (1)$$

式中: M 为预紧力矩, $N \cdot m$; k 为拧紧力系数,取0.2; d 为螺纹公称直径, mm 。现场安装螺栓预警力矩为110 $N \cdot m$,螺纹公称直径为16 mm ,计算得到每个螺纹孔的预紧力为34.375 kN ,与文献[13]仿真螺孔失效分析施加预紧力40 kN 相近,法兰上共有12个均匀分布的螺栓。在现场实际安装过程中,工人手拧螺栓,可能存在紧固不均匀的现象,当紧固力矩偏差达到10 $N \cdot m$ 时,该螺栓预紧力偏差达到3 125 N 。该螺栓附近的夹紧力分布采用二维正态分布,夹紧力概率密度如下:

$$f(x,y) = \left(2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2} \right) \exp \left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \times \left(\frac{(x-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\rho(x-\mu_1)(y-\mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(y-\mu_2)^2}{\sigma_2^2} \right) \right] \quad (2)$$

式中: μ_1, μ_2 为位置参数,分别表示中心点横、纵坐标; ρ 为相关系数, x, y 独立分布, $\rho=0$; σ_1, σ_2 为刻度参数, $\sigma_1>0, \sigma_2>0$ 。在 xz 平面取其中一个螺栓孔定位(184,0),在此螺栓紧固力矩设置为120 $N \cdot m$ 。当 $\sigma_1=\sigma_2=25$,距离定位中心半径8 mm 处,夹紧力概率密度与螺栓中心点近似相等。

如图2所示,在边界区域计算存在应力集中的问题,较大应力集中在盆式绝缘子凹槽与盆体倾斜过渡

部分,但沿着圆周均匀分布,表明螺栓紧固均匀程度对有金属法兰的盆式绝缘子应力分布影响很小。

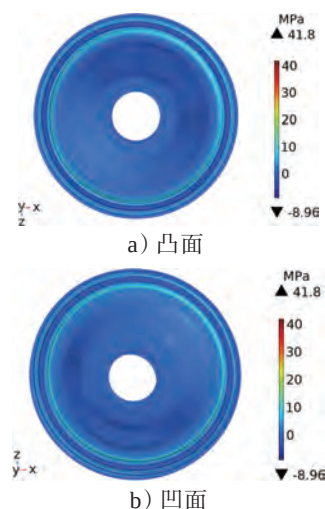


图2 螺栓紧固不均匀盆式绝缘子应力分布云图

2.2 盆式绝缘子单侧受压

盆式绝缘子将GIS分成多个间隔,每个间隔充入 SF_6 或 SF_6/N_2 混合气体,一旦盆式绝缘子密封圈凹槽处产生裂纹,则考虑极端情况。当一侧气体全部泄露,盆式绝缘子承受单侧0.42 MPa气体压力,另一侧将承受大气压力。如图3所示,当盆式绝缘子凸面侧承受气压作用,第一主应力最大值6.39 MPa在盆式绝缘子凸面侧凹槽处;反之,凹面侧承受气压作用,第一主应力最大值7.8 MPa在盆式绝缘子凸面侧凹槽处,这两种情况下,盆式绝缘子受力都远小于破坏强度65 MPa。正常情况下气体压力无法造成盆式绝缘子发生破坏。凹面侧承压盆式绝缘子应力更大,故盆式绝缘子例行水压试验采用凹面侧施加压力。

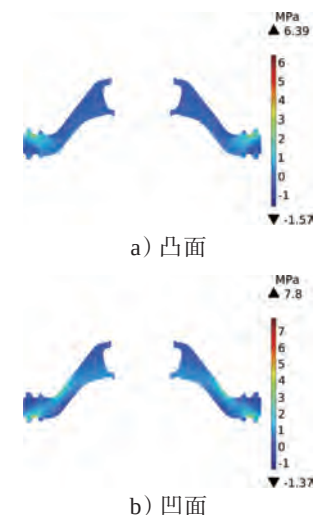


图3 盆式绝缘子单侧承压应力分布图

对盆式绝缘子开展水压例行和破坏试验,试验加载过程如图4(a)所示,在其凹面侧施加1.6 MPa(2倍设计压力)水压并保压1 min,试验过程中不应有爆裂声、裂痕及泄露;水压破坏试验压力在凹面侧施加,破坏值应大于2.4 MPa(3倍设计压力)。试验过程中水压加压速率为0.4 MPa/min。例行试验保压过程中无异常情况,该盆式绝缘子水压破坏值为2.52 MPa,超过2.4 MPa最低限值。分析破坏形貌,如图4(b)所示,盆式绝缘子裂纹从凹槽处起始并拓展,且出现了中心金属导体嵌件与盆体界面脱粘的现象。

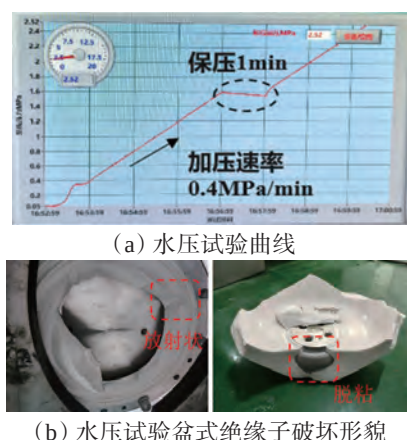


图4 盆式绝缘子水压试验

在盆式绝缘凹面侧压力为2.4 MPa及2.52 MPa时进行有限元仿真。如图5所示,当凹面侧压力为2.4 MPa时,盆式绝缘子最大应力为57 MPa,当压力达到2.52 MPa时,盆式绝缘子最大应力为60 MPa,即当环氧树脂复合材料的拉伸强度达到60 MPa,盆式绝缘子发生破坏,与文献[12]中参考值65 MPa相近。最大应力集中在凹槽处,与盆式绝缘子裂纹拓展起始点一致。

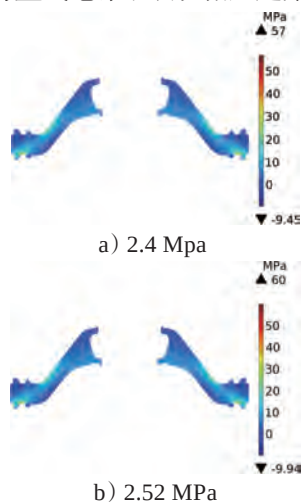


图5 水压试验盆式绝缘子应力分布

2.3 盆式绝缘子轴向异常受力

如图6所示,在现场安装过程中,将母线插入屏蔽罩(静触座)进行连接,由于事先未进行对中,在安装过程中对盆式绝缘子产生冲撞,盆式绝缘子受到轴向冲击压力作用。如图7所示,垂直于中心嵌件,施加从凸面侧指向凹面侧的轴向力,当轴向力为220 kN时,达到盆式绝缘子的破坏强度。而凹面侧只需施加130 kN,盆式绝缘子就会发生破坏。综上所述,在安装过程中尤其应注意防止盆式绝缘子凹面受压。

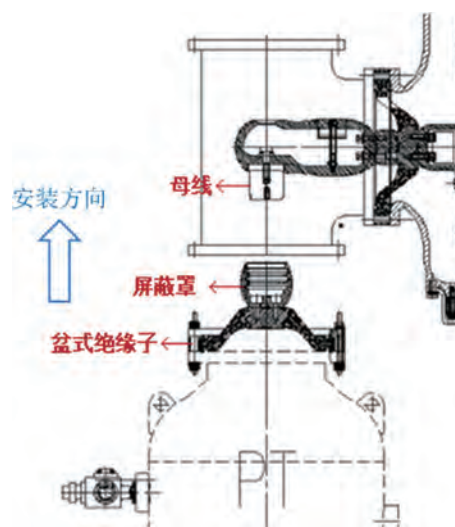


图6 GIS电压互感器安装过程

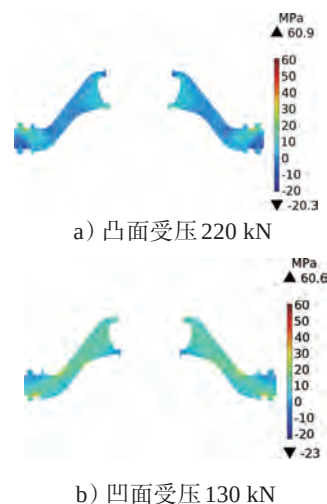


图7 轴向力异常盆式绝缘子应力分布

2.4 盆式绝缘子弯矩异常受力

在盆式绝缘子制造过程中,中心嵌件存在倾斜,现场安装后母线与盆式绝缘子不垂直,导致盆式绝缘子长期受到弯矩作用。如图8所示,向x轴正方向施加力达到10.64 kN·m时,凸面侧盆体由倾斜向水平

过渡处出现大面积应力集中,凹面侧在密封圈凹槽处出现应力集中,最大应力值为 60.8 MPa,达到该盆式绝缘子的破坏值。

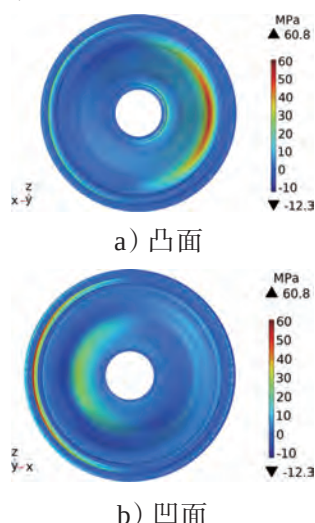


图8 弯矩异常盆式绝缘子应力分布

3 结语

文中对 220 kV GIS 用盆式绝缘子安装、运输和运行过程中异常受力现象进行有限元仿真。

1) 对于带金属法兰的盆式绝缘子,螺栓紧固应力集中在凹槽与盆体倾斜过渡段,沿圆周均匀分布,推断可知,螺栓紧固不均匀对盆式绝缘子应力分布影响很小。

2) GIS 用盆式绝缘子发生单侧气体泄露时,0.42 MPa 气体压力产生的应力不足以破坏盆式绝缘子。研究发现,凹面侧气体压力造成的应力值为 7.8 MPa,大于凸面侧的应力值 6.39 MPa。

3) 凹面侧应力集中在盆式绝缘子密封圈凹槽处。水压破坏试验中,盆式绝缘子破坏形貌在密封圈凹槽处呈现放射状,表明裂纹从凹槽处起始。以盆式绝缘子破坏水压 2.52 MPa 为依据,计算该形状的盆式绝缘子破坏强度为 60 MPa。因此,盆式绝缘子在设计过程中需考虑加大密封圈凹槽处机械强度。

4) 当凸面侧轴向压力达到 220 kN 时,盆式绝缘子发生破坏,而凹面侧轴向压力只需 130 kN 会发生

同样情况。因此,在盆式绝缘子安装过程中要防止凹面侧发生碰撞。

5) 弯矩造成盆式绝缘子凸面侧盆体由倾斜向水平过渡部位产生大面积应力集中,凹面侧在密封圈凹槽处出现应力集中。当弯矩达到 10.64 kN·m 时,盆式绝缘子发生破坏。当盆式绝缘子连接长母线时,安装过程要进行对中,避免盆式绝缘子长期受到弯矩作用。

参考文献:

- [1] 王超,李文栋,陈泰然,等.550 kV GIS 盆式绝缘子小型化设计(一)——几何形状优化[J].电工技术学报,2022, 37(07): 1847-1855.
- [2] 陈拴成,康留涛,孙博洋.800 kV GIS 设备用盆式绝缘子设计开发[J].电工电气,2023(12):54-58.
- [3] 姜辉,何柏娜,边晨曦,等.基于有限元迭代计算的盆式绝缘子电场综合优化[J].电瓷避雷器,2024(02):120-127.
- [4] 何成,王欣欣,游溢,等.750 kV GIS 盆式绝缘子固化不均匀对其电场的影响[J/OL].电瓷避雷器,1-12[2025-03-13].
- [5] 吕岩婷,蒋菲,张素慧,等.一起 GIS 用盆式绝缘子原始缺陷导致开裂故障分析[J].电瓷避雷器,2024(03):180-185.
- [6] 王永强,胡芳芳,李长元,等.典型内部缺陷下 GIS 盆式绝缘子有限元应力分析[J].绝缘材料,2017,50(01):78-83.
- [7] 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(02):240-245.
- [8] 王峻峰.一起 500 kV GIS 盆式绝缘子泄漏问题分析[J].中国机械,2024(36):106-109.
- [9] 朱思佳,张语桐,闫爽,等.特高压盆式绝缘子水压试验与中心嵌件结构优化[J/OL].高电压技术,1-10[2025-03-13].
- [10] 崔庆,谢文刚,刘传贺,等.基于 ANSYS 的 800 kV GIS 母线用盆式绝缘子机械强度分析[J].电工技术,2023(02):99-101.
- [11] 王闯,贾静,赵朗,等.特高压 1 100 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(02):155-162.
- [12] 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.
- [13] 李哲,周建,胡卡,等.GIS 盆式绝缘子螺孔失效分析[J].中国设备工程,2022(18):131-134.