第 51 卷 第 5 期：2506-2515 高电压技术 Vol.51, No.5: 2506-2515
2025 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240853

特高压盆式绝缘子水压试验与中心嵌件结构优化

朱思佳[1]，张语桐[1]，闫　爽[1]，张鹏飞[2]，刘　鹏[1]，彭宗仁[1]
（1. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室，西安 710049;
2. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192）

摘　要：中心嵌件结构是影响特高压盆式绝缘子力学性能的关键，合理的结构优化设计可有效提升绝缘子水压破坏值和设计裕度，保障绝缘子安全稳定运行。为此，建立了盆式绝缘子的电场、应力场分布仿真计算模型，对比了不同中心嵌件结构型式方案；在此基础上进行优选，探究了中心嵌件应力释放槽和倒角过渡线典型结构参数对界面应力的影响，得出了中心嵌件的优化结构和绝缘子水压破坏机制，开展了试验验证。结果表明，凸起金属部分可以降低三结合区的应力分布。此外，靠近界面、深度增加的应力释放槽配合适当的加工宽度可以降低三结合点应力值，在界面端部用倒角过渡可以消除三结合点应力最大的现象。优化后绝缘子三结合点应力值可降低92.94%，界面应力最大值降低 83.22%，绝缘子耐受 4.5 MPa 水压后仍可通过电气性能试验，验证了优化设计的有效性和可行性。研究结果可为盆式绝缘子的结构设计和优化调控提供参考。

关键词：盆式绝缘子；中心嵌件；水压试验；应力分布；结构优化

Hydraulic Test of UHV Basin Insulator and Structure Optimization of Center Insert

ZHU Sijia[1], ZHANG Yutong[1], YAN Shuang[1], ZHANG Pengfei[2], LIU Peng[1], PENG Zongren[1]
(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)

Abstract: The center insert structure is the key to influencing the mechanical properties of UHV basin insulators. Reasonable structural optimization design can effectively improve the hydraulic failure value and design margin of insulators, and ensure the safe and stable operation of insulators. In this paper, the electric field and stress field distribution simulation model of the basin insulator is established, and different center insert structural schemes are compared. Based on this, the influence of typical structural parameters of the stress release groove and fillet transition line on the interface stress is explored. The optimal structure of the center insert and the hydraulic failure mechanism of the insulator are obtained, and experimental verification is carried out. The results show that convex metal can reduce the stress distribution in the trijunction zone. Furthermore, the stress value at the trijunction point can be reduced by the stress release groove which is deeper and closer to the interface with the appropriate processing width. The phenomenon can be eliminated that the maximum stress is at the trijunction point by using a fillet transition zone. After optimization, the stress value of the trijunction point of the insulator can be reduced by 92.94%, and the maximum interface stress can be reduced by 83.22%. The insulators can still pass the electrical performance test after they have been loaded with 4.5 MPa hydraulic pressure, which verifies the effectiveness and feasibility of the optimized design. The research results can provide a reference for the structural design and optimal control of the basin insulator.

Key words: basin insulator; center insert; hydraulic test; stress distribution; structure optimization

0　引言

气体绝缘金属封闭输电线路(gas-insulated metal-enclosed transmission line, GIL)具有输送容量大，能量损耗低，占地面积小，受环境影响小等优点[1-2]，在化工、核电、海上风电、柔性直流输电、城市管廊输电等领域具有广阔的应用前景。GIL 以压缩气体为绝缘介质，通常将高压导杆与接地金属外壳同轴布置，通过绝缘子进行机械支撑和电气绝缘。受其结构特点影响，特高压盆式绝缘子长期受到电场、温度等多种作用共同影响，还需要隔离气室，承受一定的轴向压力载荷，因此运行条件复杂，设计时

基金资助项目：国家电网公司总部科技项目(5500-202316791A-3-8-KJ)；电工材料电气绝缘全国重点实验室自主研究课题(EIPE23130)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5500-202316791A-3-8-KJ), State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (EIPE23130).

各结构间相互影响，需要考虑的因素多样。为保障GIL的安全稳定运行，盆式绝缘子的结构可靠设计和分析一直以来都是研究的重点[3-4]。

近年来，国内学者和制造企业对盆式绝缘子开展了国产化研发，较大地改善了其电气、机械性能，在材料、结构、工艺等方面累积了一定经验[5-6]，但对盆式绝缘子优化改进仍在进行。贾云飞等人分析了绝缘子局部结构参数对关键控制指标的影响，指出了电场优化和力场优化需求的互斥性，优化了绝缘子表面电场分布[7]。王超等人对550 kV盆式绝缘子的盆体轮廓和两端厚度进行优化设计，并引入功能梯度材料实现介电分布优化[8-9]。张维凯等人基于非支配排序多目标遗传算法(NSGA-Ⅱ)实现了盆式绝缘子凸面和凹面的结构优化，改善了绝缘子表面电场分布[10]。然而，以上研究通常以提高绝缘性能为首要优化目标，仅把机械性能作为校核指标，甚至牺牲了一定的机械裕度以降低电场强度，优化后的绝缘子关键部位的应力值仍相对较高，且缺乏对实际绝缘子机械性能的试验验证。

事实上，盆式绝缘子的机械缺陷是造成绝缘子故障的重要原因之一[11-12]。运行条件下，盆式绝缘子一旦出现气隙、裂纹等，可能会发生电场畸变并引发放电[13-14]，显著影响设备的可靠运行。已有研究表明，中心嵌件与盆体的界面是盆式绝缘子水压破坏的最薄弱环节，水压破坏往往起源于中心嵌件附近的裂纹[15]。王闯等人研究了盆式绝缘子生产过程中在中心嵌件与盆体间应力的形成过程，发现界面处的切应力是造成水压试验中界面处出现大面积剥离的主要因素[16]。Zihao Guo通过有限元仿真计算发现，在水压作用下绝缘子的中心嵌件、盆体与气体的三结合点处应力集中程度最严重[17]。陈承相仿真模拟了固化成型过程中盆式绝缘子的温度、固化度、应力分布，发现中心嵌件附近产生的最大应力值高达34.1 MPa[18]。另一方面，为减少气体泄漏，特高压GIL盆式绝缘子采用内置式安装方式，整体尺寸缩小，绝缘子锥度增大，使中心嵌件附近受力工况更加恶劣，需重点关注。以往研究以优化盆体为主，外形变化大，要求重新设计、制造配套模具，增加了制造成本和生产工期；仅对嵌件结构进行简单分析，未详细探究关键结构参数对性能的影响，采用智能算法优化的嵌件结构受其基本形态的约束，可能遗漏具备更高性能的新型结构。相比之下，在现有绝缘子基础上调整中心嵌件结构，对其他部位的性能影响较小且更加经济高效。因此，有必要详细研究中心嵌件关键结构参数对机械、电气性能的影响，结合试验验证优化结构的可靠性，以获得性能更优的新型产品。

为此，本文以特高压GIL盆式绝缘子为研究对象，对比分析了不同中心嵌件结构型式下盆式绝缘子的电场和应力场分布，在优选结构的基础上，探究了应力释放槽、倒角过渡线关键参数对应力场分布的影响规律，优化设计了绝缘子中心导体结构。基于优化结构制造了盆式绝缘子试验样件，在关键位置布置应变传感器并依次开展了水压和电气性能试验。进一步地，比较了优化前后盆式绝缘子水压试验结果与破坏形态，得出了绝缘子的破坏过程，验证了本文设计结构的有效性和可行性。

1　特高压盆式绝缘子的电气和机械特性仿真分析

1.1　计算模型

特高压GIL盆式绝缘子的初始结构截面如图1所示，其主要由中心嵌件、绝缘盆体和内置在盆式绝缘子接地端附近的屏蔽环3部分组成。中心嵌件与盆体间的界面曲线由两条直线段和一段内凹圆弧组成。GIL管道单元还包括GIL壳体、密封圈、微粒捕捉器、载流导杆、屏蔽罩和SF_6气体等。在建模过程中忽略了载流导杆与屏蔽罩的插接结构以及螺栓螺杆等连接结构，并假定密封圈填满了盆体接地端附近的凹槽。

运行工况下，机械载荷导致的绝缘子形变对电场分布的影响可以忽略不计，因此分别基于静电场和固体力学场仿真计算绝缘子在运行条件下的电场分布和1.0 MPa水压试验时的应力分布，所需材料参数如表1所示[19]。电场强度计算时，屏蔽环、GIL

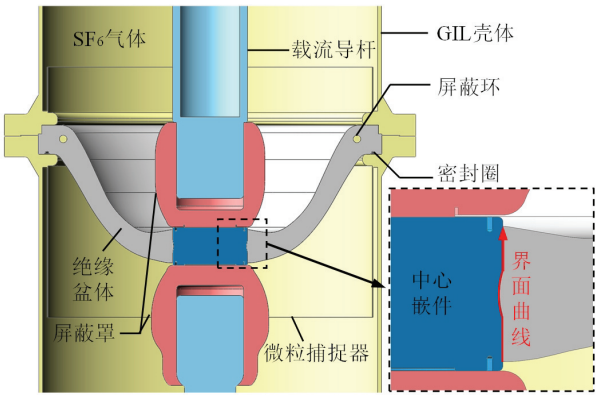


图1　特高压GIL盆式绝缘子的初始结构设计

Fig.1　Initial structural design of UHV GIL basin insulator

表 1 仿真所用材料属性

Table 1 Properties of the materials used in the simulation

部件	介电常数	密度/(g·cm^{-3})	杨氏模量/GPa	泊松比
盆体	6.3	2.3	11	0.35
密封圈	4.0	1.2	0.007	0.49
绝缘气体	1.002	—	—	—
中心嵌件、屏蔽环	—	2.7	69	0.33

壳体和微粒捕捉器设为接地，中心嵌件和导体加载的电压值取运行电压有效值 635 kV。机械性能计算时，在盆式绝缘子凹面加载 1.0 MPa 压强，凸面与水压工装的接触位置设为固定约束；忽略了不影响绝缘子应力分布的屏蔽罩、GIL 壳体、密封圈和微粒捕捉器等结构。

将中心嵌件与盆体间的界面曲线剖分为 0.01~0.10 mm 的单元，将中心嵌件、绝缘盆体和屏蔽环剖分为 0.044~21.900 mm 的自由三角形网格，将 SF_6 气体和密封圈剖分为 0.200~21.900 mm 的自由三角形网格，其余部分为 0.274 mm 以上的自由三角形网格。

1.2 计算结果与分析

本节的绝缘性能仿真重点关注绝缘子中心嵌件附近的电场分布。从图 2 中可以看出，电场主要分布在高压导体屏蔽罩表面，最大场强为 5.76 kV/mm；在中心嵌件与盆体的界面上，电场强度最大值为 3.43 kV/mm，位于直线段和圆弧的交点；盆体凹面和凸面的最大场强分别为 2.71 kV/mm 和 2.25 kV/mm。

在绝缘子的机械性能分析时，由于环氧氧化铝复合材料为脆性材料，盆体的断裂强度通常用第一强度理论判定[20]，即当第一主应力 σ_1 大于等于材料的拉伸破坏强度(65 MPa)时发生断裂。针对中心嵌件-盆体粘接界面，当界面上的第一主应力高于界面粘接抗拉强度(30 MPa)或剪切应力高于粘接剪切强度(15 MPa)时，可认为粘接界面出现破坏[21]。

盆式绝缘子的第一主应力分布如图 3 所示。从图中可以看出，盆面第一主应力主要集中在盆体凹面的“位置 1”和盆体凸面接地端附近的“位置 2”，在单位水压载荷下第一主应力最大值分别为 8.19 MPa 和 12.05 MPa。在中心嵌件-盆体界面上的应力最大值位于盆体、中心嵌件、绝缘气体三相交界的三结合点(位置 3)处，第一主应力最大值为 24.08 MPa，剪切应力为 5.21 MPa。若不考虑中心

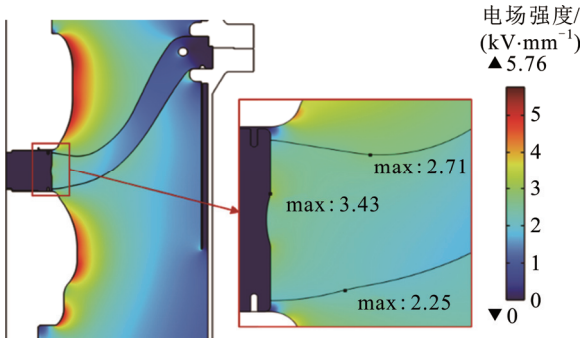


图 2 盆式绝缘子初始设计的电场分布

Fig.2 Electric field distribution of initial design of basin insulator

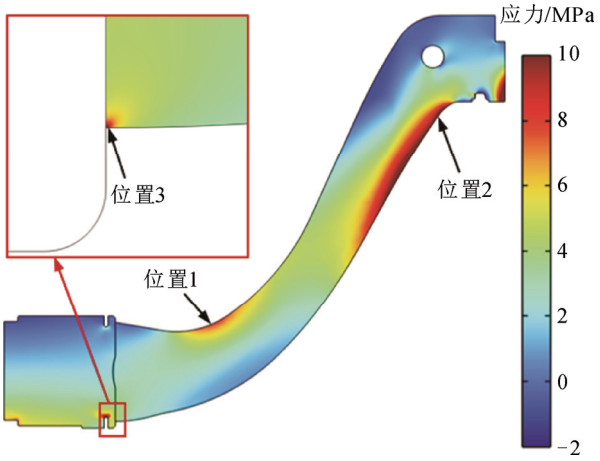


图 3 盆式绝缘子初始设计的应力分布

Fig.3 Stress distribution of initial design of basin insulator

嵌件-盆体界面，当材料拉伸破坏强度值为 65 MPa 时，盆式绝缘子的水压破坏值应大于 5.3 MPa。然而经开模浇筑，获得的盆式绝缘子在水压破坏试验时破坏值仅为 2.4 MPa，这就必须考虑由中心嵌件-盆体的界面引起的破坏。

为进一步分析，图 4 给出了该盆式绝缘子水压破坏后的形貌。从图 4 中可以看出，盆式绝缘子的破坏形态呈“花瓣形”，盆体与中心嵌件几乎完全剥离，从中心嵌件处引出 3 条径向裂纹经过位置 1 到达位置 2 附近，环向和径向的裂纹共同作用将盆体分裂。盆体碎块具有数量少、体积大、围绕中心嵌件对称分布等特点，说明破坏时大部分盆体材料受力并未达到临界破坏值。根据应力计算，在水压值达到 1.25 MPa 时，三结合点处开始出现粘接破坏。粘接破坏区域附近应力集中，且随着试验过程中水压载荷不断增加愈发严重，导致界面脱粘范围越来越大，引发中心嵌件与盆体剥离，使盆体迅速开裂

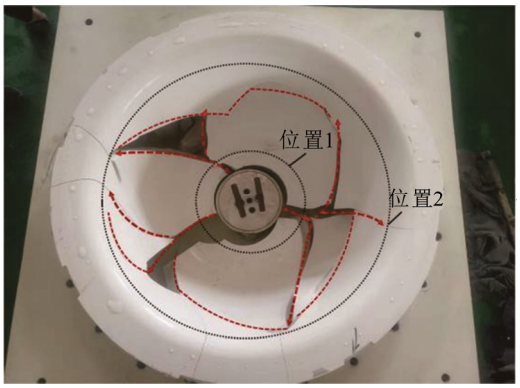


图 4　初始设计盆式绝缘子破坏形貌

Fig.4　Damage morphology of initial basin insulator

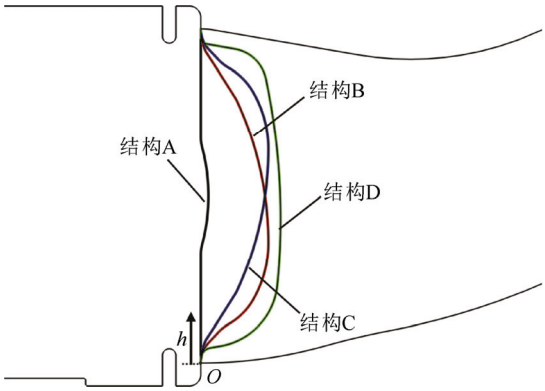


图 5　盆式绝缘子中心嵌件结构型式

Fig.5　Structure type of basin insulator center insert

直至绝缘子破坏。因此，需进一步优化盆式绝缘子中心嵌件结构，以实现电场和应力场的平衡调控，提升绝缘子机械和电气性能。

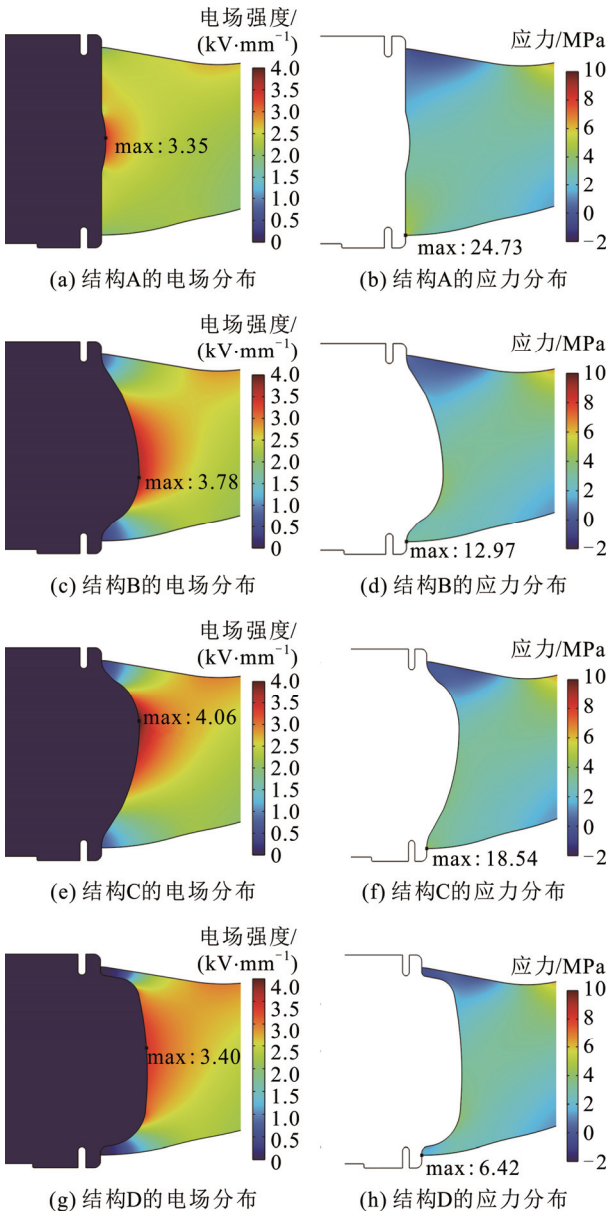
2　中心嵌件结构型式对盆式绝缘子机械、电气性能的影响

为改善盆式绝缘子中心嵌件处的应力场分布，释缓应力集中现象，提升盆式绝缘子水压破坏值，以增强其在应用时的可靠性，本文提出了 4 种具有代表性的中心嵌件结构型式展开初步分析，择优进行优化以获得最终结构。不同结构型式的中心嵌件轮廓如图 5 所示。其中，结构 A 保留了初始的直筒型设计，并将圆弧由凹改凸；结构 B 和 C 分别为偏向盆体凸面和凹面的单侧凸起结构。结构 A、B 和 C 均为目前特高压工程中广泛采用的结构类型。结构 D 向盆体凹面和凸面均有凸起，是本文提出的新型中心嵌件构型。

通过计算，图 6 给出了不同结构型式中心嵌件附近的电场和第一主应力分布云图。

电场分布方面，结构 A 的最大场强为 3.35 kV/mm，位于凸起圆弧的中心位置；结构 B 和结构 C 最大场强分别为 3.78 kV/mm 和 4.06 kV/mm，均位于界面曲线上径向距离最大的位置；结构 D 在凸起部分上的电场分布较为均匀，最大场强为 3.40 kV/mm。

应力分布方面，结构 A 的应力自下而上有逐渐降低的趋势；结构 B 和结构 D 在中心嵌件靠近盆体凸面的部分均有一个高应力区；结构 C 在高曲率半径的位置应力较高，亦靠近盆体凸面。然而，在单位水压载荷作用下，结构 A—结构 D 的应力最大值分别为 24.73、12.97、18.54 和 6.42 MPa，均位于三结合点，是盆式绝缘子机械性能的最薄弱的地方。



(a) 结构A的电场分布　(b) 结构A的应力分布

(c) 结构B的电场分布　(d) 结构B的应力分布

(e) 结构C的电场分布　(f) 结构C的应力分布

(g) 结构D的电场分布　(h) 结构D的应力分布

图 6　不同结构型式中心嵌件附近的电场、应力分布云图

Fig.6　Electric field and stress distribution near the center insert of different structural types

图 7 以三结合点为原点 O，中心嵌件-盆体界面曲线上各处相对 O 点的垂直高度 h 为横坐标，绘制了单位水压载荷作用下界面曲线上应力的分布情况。根据垂直高度 h 的大小将界面曲线分为上三交区(86 mm≤h≤88 mm)、界面曲线内部(2 mm≤h<86 mm)和下三交区(0≤h<2 mm)。图 7(a)中，结构 A 在直线段轮廓上的第一主应力分布与初始设计基本一致，主要差异在中心嵌件的圆弧部分，与初始设计中的凹陷形圆弧相比，结构 A 的凸起形圆弧在其下端点附近(h ≈ 30 mm)的应力从 3.48 MPa 降低到 2.87 MPa，降低近 17.5%，说明凸起的形状对圆弧端点的应力集中现象有缓解作用。在界面曲线内部，结构 B、C 和 D 的应力分布曲线随着 h 增加有先升高后降低的趋势，应力最大值均在 4.1 MPa 附近。在上、下三交区，应力随着所在位置靠近界面曲线端点而迅速增加，下三交区的应力集中最显著，应力值大小为：结构 D<结构 B<结构 C<初始结构≈结构 A，与三结合点应力值的大小关系一致，这是因为结构 B—结构 D 的中心嵌件凸起部分“阻挡”了一部分应力，从应力峰到该区域应力迅速降低，使得该区域的应力保持在较低水平，从而降低了三结合点的应力集中程度。同理，结构 B—结构 D 在三结合点的剪切应力显著降低，虽在界面曲线内部剪切应力升高，但仍然有较高的粘接破坏裕度。

通过以上对比分析可以发现，结构 D 的界面场强最大值比初始设计值略低，但在三结合点处的应力值相比原有结构显著降低。因此选取结构 D 为基础，进一步对中心嵌件开展精细优化。

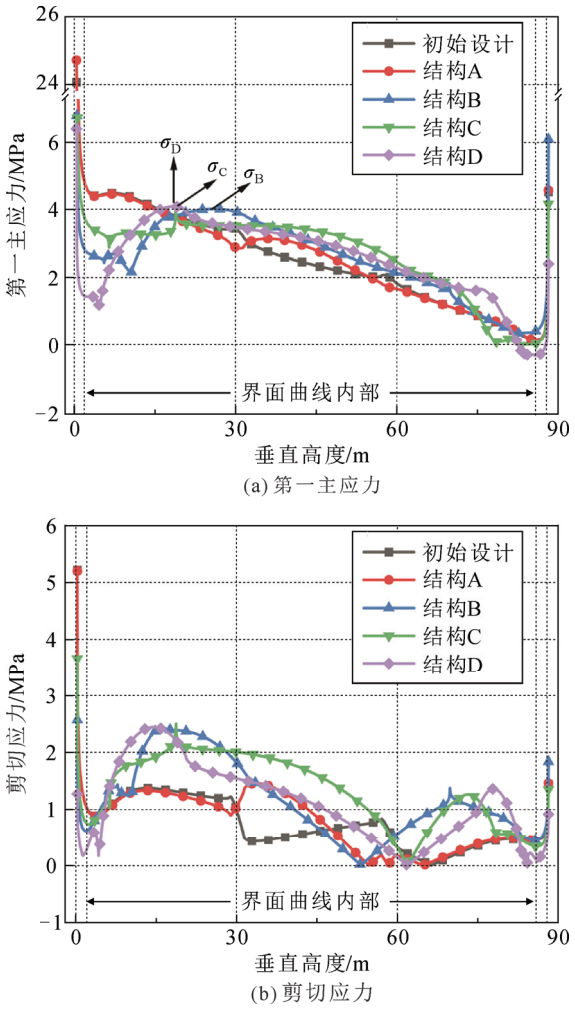


图 7 中心嵌件-盆体界面的应力分布

Fig.7 Stress distribution at the center insert-basin interface

3 中心嵌件结构参数对机械性能的影响

3.1 应力释放槽参数对机械性能的影响

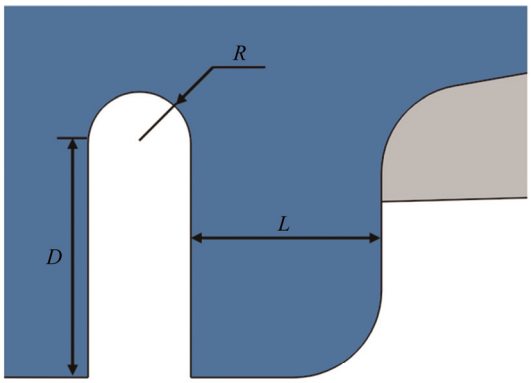
应力释放槽是开设在中心嵌件端面上的凹槽，针对绝缘子制造过程中的固化收缩，可起到释放残余应力，减小变形的作用，对绝缘子力学性能影响显著。为此，选取应力释放槽关键参数分析其对绝缘子机械性能的影响，初始设计的应力释放槽尺寸如图 8(a)所示。应力释放槽关键参数包括槽深 D、槽半径 R、与中心嵌件-树脂交界部分的距离 L。

图 8(b)给出了三结合点应力值随应力释放槽结构参数的变化规律。从图中可以看出，在计算范围内，应力释放槽越深，距离盆体越近，三结合点的应力值越低，但二者对应力值的影响规律存在差异：应力值随 L 减小呈线性降低，但随 D 增大，应力值的降低存在饱和趋势。需要说明的是，随着 L 减小和 D 增大，加工难度也越大，设计时需要统筹考虑。

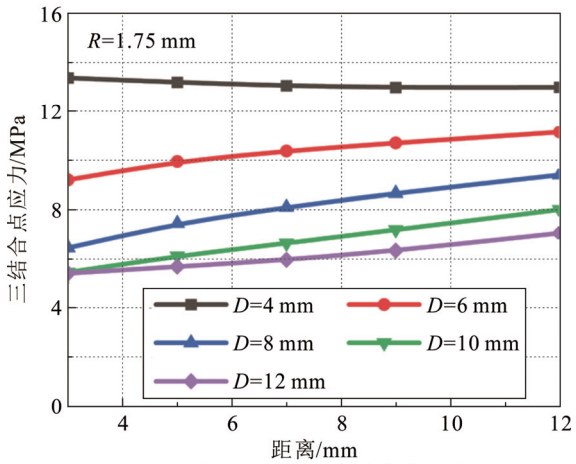
图 8(c)给出了在 L 和 D 不同取值时应力指标随 R 的变化规律，从图中可以看出，当 D=8 mm 时，三结合点应力随 R 增大而降低；当 D=10 mm 时，三结合点应力基本不变；当 D=12 mm 时，随着 R 增大，三结合点应力值线性升高但在几种组合中仍处于较低水平。因此，可考虑在 D=12 mm，L=5 mm 的条件下，将应力释放槽半径适当放宽至 3 mm 以满足机加工需求。

3.2 倒角过渡线参数对机械性能的影响

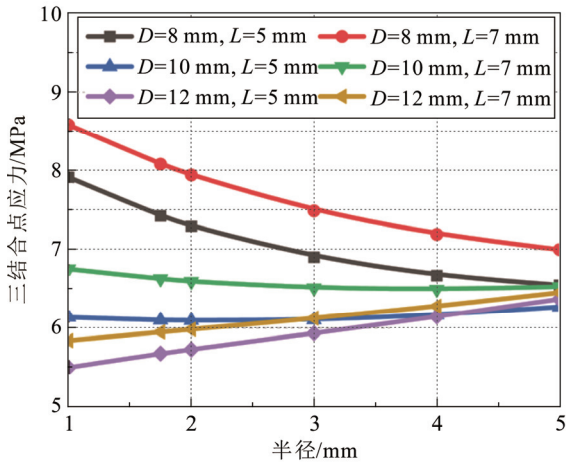
为了进一步降低三结合点的应力值，本文在界面曲线上下两端改为用倒角过渡。图 9(a)给出了该改进的结构示意图。以凸面三结合区域为例，在三结合点处增加夹角为 α 的直倒角，再通过圆弧和直线段过渡到原结构 D 的凸起部分，与凸起部分相切的圆弧半径为 R_f。



(a) 关键结构参数



(b) 位置对三结合点应力的影响

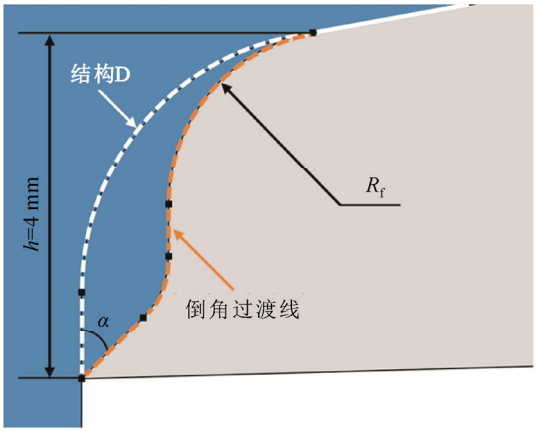


(c) 半径对三结合点应力的影响

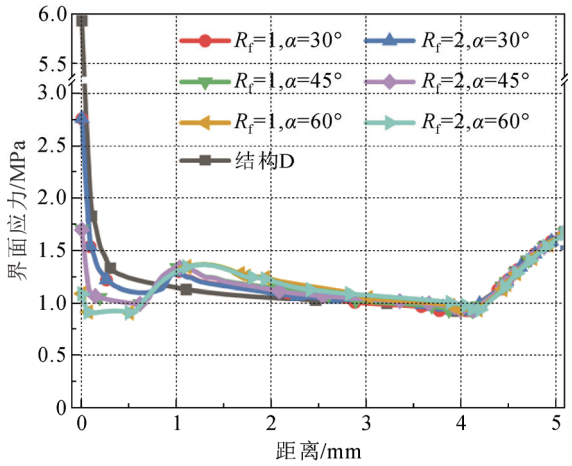
图 8　应力释放槽关键结构参数其影响

Fig.8　Structural parameters of stress release groove and their influence on stress

图 9(b)给出了倒角过渡线上的应力分布。由于倒角过渡线对结构 D 凸起部分的应力分布几乎没有影响，本节重点关注界面曲线上 h<4 mm 的区域。从图中可知，增加倒角后应力进行了重新分配，三结合点的应力下降到 3.0 MPa 以下，因此界面曲线上应力最大值所在位置从三结合点转移至结构 D 的



(a) 关键结构参数



(b) 关键参数对应力的影响

图 9　倒角过渡线关键结构参数及其影响

Fig.9　Structural parameters of fillet transition line and their influence on stress

凸起部分。三结合点应力随着 α 的增大而降低，但在 h=1 mm 附近的应力值随之增加。而在 α 相同的条件下，R_f 从 1 mm 升高至 2 mm 后在过渡线终点附近的应力值略微升高。因此，夹角 α 为 45°，R_f 为 1 mm 的倒角过渡线的优化效果最佳。

优化中心嵌件后界面上的应力分布如图 10 所示。绝缘子三结合点应力仅 1.70 MPa，界面应力最大值为 4.04 MPa，位于中心嵌件靠近盆体凸面的凸起处，与初始设计相比分别降低了 92.94%和 83.22%。盆体凹面和凸面的应力最大值分别为 8.24 MPa 和 12.01 MPa，分别增加 0.6%、减少 0.3%，预计水压破坏值高于 5.4 MPa。此时盆式绝缘子表面电场分布较初始设计基本未发生改变。

为进一步验证结构分析和优化的有效性与可行性，本文以该结构为基础，加工了 6 个中心嵌件并进行喷砂处理，涂覆界面材料后组装到模具中浇

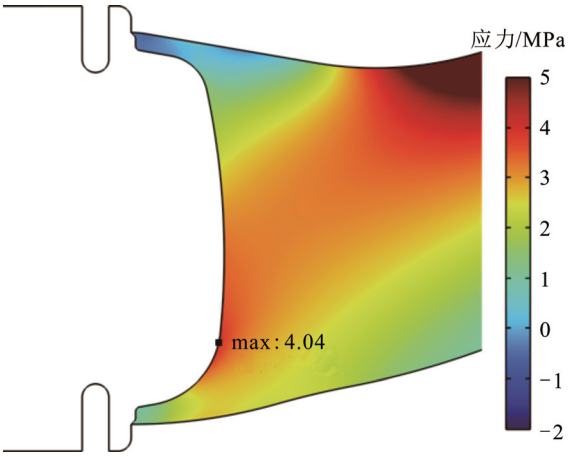


图 10 中心嵌件优化后界面上的应力分布

Fig.10 Stress distribution on the interface after the center insert optimization

注、固化环氧氧化铝复合材料，共制备了 6 支特高压 GIL 盆式绝缘子进行水压、电气性能试验验证。

4 优化结构试验验证与分析

4.1 优化结构的水压试验验证

4.1.1 试验方法

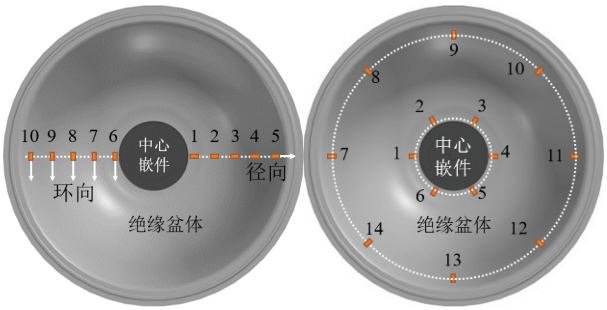
为分析绝缘子水压试验过程中的受力特性，水压试验前，将电阻式应变传感器按照如图 11 所示的两种方案粘贴在盆体凸面。

1—3 号绝缘子采用方案 1：沿绝缘子径向在距离中心嵌件 1、101、201、301 和 420 mm 处(位置 2 附近)各取 2 个点，分别沿径向和环向粘贴应变传感器。4—6 号绝缘子采用方案 2：在盆体距离中心嵌件 1 mm 的位置选取 6 个对称分布的点，在距离中心嵌件 420 mm 的环线上选取 8 个对称分布的点，全部沿径向布置传感器。检测点按照“绝缘子编号#位置编号”命名。采用东华电测 DH8303 动态信号测试分析系统试验系统记录数据。

试验时，以低于 400 kPa/min 的速度加载水压，记录应变传感器信号变化，同时用录像机记录水压值的变化情况。受水压工装限制，试验采用方案如下：若在水压值小于 4.5 MPa 时盆式绝缘子发生破坏，则记录水压破坏值；若水压值达到 4.5 MPa 时盆式绝缘子没有破坏，则保持 10 min 后泄压，观察绝缘子没有漏气、裂纹等现象则视为通过。

4.1.2 仿真结果校核

选取 1、4 号特高压 GIL 盆式绝缘子水压试验结果，绘制不同布置方案下应变-水压的变化曲线如图 12 所示。从图 12(a)可以看出，1 号绝缘子径向



(a) 方案 1 (b) 方案 2

图 11 盆式绝缘子应变传感器布置方案

Fig.11 Layout schemes of strain sensor on basin insulator

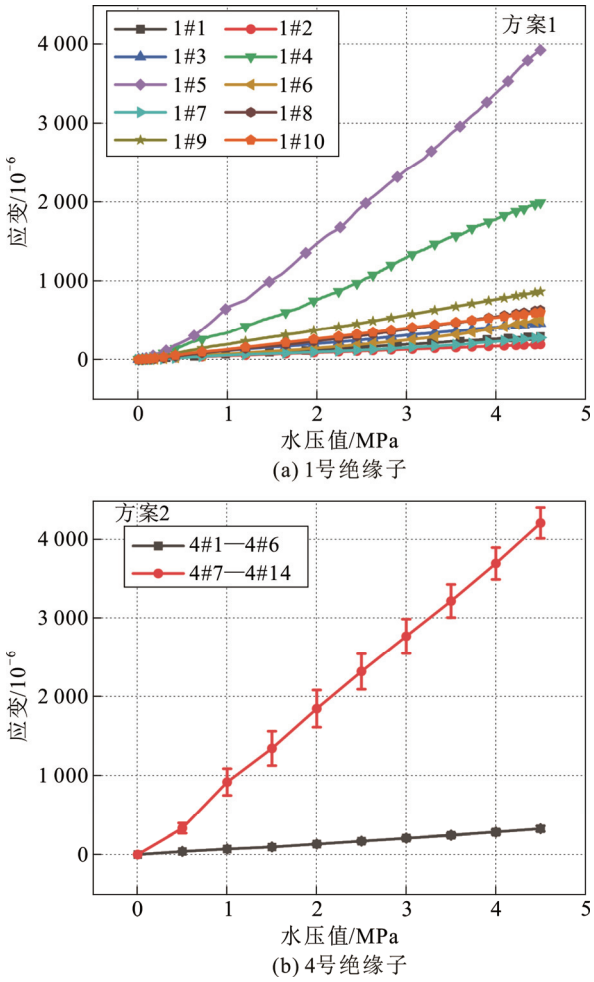


图 12 采用不同布置方案的应变-水压变化曲线

Fig.12 Strain - hydraulic value curves of different layout schemes

应变中，从 1#2 至 1#5 的应变值依次增大，1#1 的应变值略高于 1#2；环向应变的变化幅度较小，1#7 应变最小而 1#9 环向应变最大，1#8 和 1#10 比较接近而略高于 1#6。4 号绝缘子采用方案 2 布置，图 12(b)绘制了 4#1—4#6、4#7—4#14 的应变平均值，分别代表中心嵌件-盆体界面附近、盆体凸面高应力

区的应变变化。高应力区的 4#7—4#14 距离中心嵌件较远，应变值误差与传感器粘贴方向偏移、水压工装表面不平、螺栓紧固件预应力分布不均等因素有关，误差棒会随水压值升高而增大。绝缘子盆体表面不同位置的应变均应随水压值的升高而线性增加。应变曲线平滑没有突变反映了绝缘子中没有发生裂纹等异常情况。

为了进一步分析绝缘子各处应变的变化规律，计算了 1 MPa 水压时盆体上各点沿径、环向和法向的应变情况，提取绝缘子凸面上沿径向的计算结果，如图 13 所示。图中应变值为正表示拉伸，为负表示压缩应变。

从图 13 中可以看出，在距中心嵌件 0~100 mm 内，盆体凸面受到径向和环向的拉伸作用，在法向上受到压缩；在距离中心嵌件 100~170 mm 的范围内，盆体凸面主要受到环向拉伸作用，沿径向和法向受到微弱的压缩作用；此后盆体上沿径向和环向的拉伸应变与法向上的压缩应变先增大后减小。在距中心嵌件 410 mm 以上，径向应变和法向应变再次增加并在 420 mm 附近达到最大值。由于在水压试验中接地端固定，盆体凸面接地端附近受到压缩，对应的应变值迅速降为负值。此外本文对 1—3 号绝缘子各处的应变-水压曲线进行线性拟合，取同一位置测量点的斜率平均值作为该点的应变校核值。各点径向与环向应变校核值均在应变曲线附近，拟合效果良好，说明了仿真计算模型的可靠性。

4.1.3　水压试验结果分析

6 支绝缘子中 5 支通过了试验验证，能在 4.5 MPa 水压作用下保持 10 min 而不发生破坏，对应的应变曲线也没有突变，证明了该结构的机械性能处于行业领先水平。而 6 号绝缘子在 4.2 MPa 时发生破裂，断裂形貌如图 14 所示，图 15 给出了该绝缘子应变随时间的变化曲线。

图 14 中中心嵌件和盆体之间有界面脱粘，脱粘尺寸约为 11 cm×6 cm。在盆体凹面和盆体凸面上量个高应力区(位置 1 和位置 2)形成了“双环形”裂纹。两个环形裂纹之间形成的裂纹将盆体沿径向分割成许多碎块，碎块明显多于图 4，这说明优化结构可以充分发挥盆体材料的机械性能。

在脱粘界面附近可观察到数条裂纹，其从盆体凹面延伸到盆体凸面，说明界面脱粘是从靠近凹面的位置开始的，这与绝缘子界面上的应力最大值所

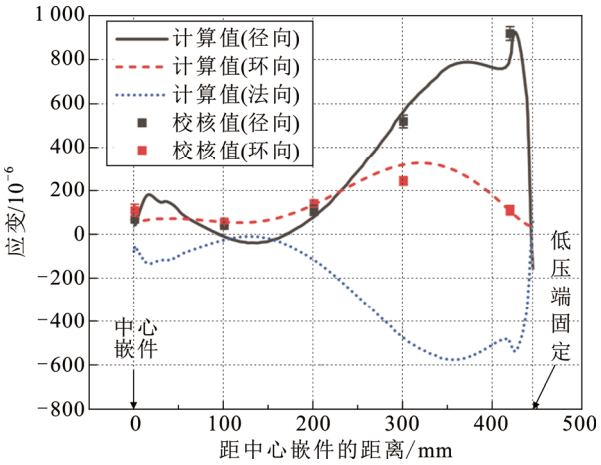


图 13　盆式绝缘子凸面应变计算值和校核值对比

Fig.13　Comparison of calculated and experimental strains on the convex surface of basin insulators

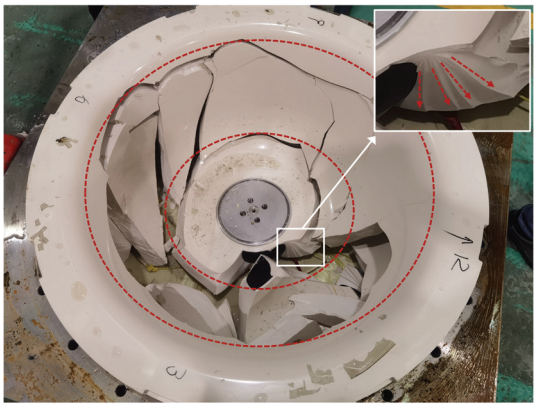


图 14　6 号绝缘子的破坏形貌

Fig.14　Damage morphology of No.6 basin insulator

在位置靠近凸面的计算结果矛盾，原因可能是中心嵌件表面预先涂覆的橡胶基界面材料在绝缘子固化过程中受环氧复合材料固化放热影响而过硫化，局部失去弹性和粘接性能，导致了提前失效。该现象说明在盆式绝缘子制造过程中应考虑工艺对性能的影响，以防界面材料超出合理使用范围造成工艺分散性，使绝缘子发生破坏。

通过比较图 15 中应变值突变的先后顺序，可以进一步分析绝缘子机械破坏的过程：在中心嵌件附近，6#6 首先由正值迅速变为负值，水压值达到 3.7 MPa 后 6#5、6#1 和 6#2 依次突变，最后 6#3 和 6#4 在 3.95 MPa 时分别骤减或突增。6#6 与 6#5 下降时对应的水压值相差 2.1 MPa，这说明位置 6 附近出现的微缺陷使 6#6 受到了压缩但在很长一段时间内对其他位置的应变影响较小，即该缺陷出现后

需要达到到足够高的应力和能量才能继续扩展。6#1的剧增是由于电阻式应变传感器被贯穿开路，它反映了在盆体凸面围绕中心嵌件形成裂纹。得益于中心嵌件的凸起结构有一定“阻挡”作用，盆体与中心嵌件界面的大部分仍保持粘接，在一定程度上缓释了局部界面脱粘导致的盆应力畸变，直到4.2 MPa 时盆体高应力区无法承受脱粘和水压叠加的应力作用而破坏。

通过以上试验可知，优化后的结构 D 中心嵌件能够显著提升盆式绝缘子的机械强度。同时也表明，绝缘子水压破坏值受到多种因素影响，在优化绝缘子结构的同时还应提高界面涂覆材料的耐高温性能和粘接强度。

4.2 优化结构的电气性能试验验证

针对通过水压试验考核的盆式绝缘子单独开展电气性能试验，依次进行了雷电冲击、工频耐压和局部放电试验。雷电冲击电压试验，采用峰值 1.2/50 μs 雷电波，峰值 2 400 kV，正负极性各测试 3 次；工频耐压试验将电压升高至 1 100 kV 保持 5 min，此后开展局部放电试验，将电压降至局放试验电压 762 kV，测试此时的局放量。

表 2 给出了优化结构的电气性能试验结果，1—5 号绝缘子均通过了电气性能试验，证明了优化结构的盆式绝缘子具有良好的电气性能。每支绝缘子在 762 kV 的局放量，均低于 1.3 pC，满足技术规范要求[22]，且说明 5 支绝缘子在加载 4.5 MPa 水压后没有产生裂纹、气隙等造成局放量增大的缺陷。

5 结论

1）在盆面结构设计合理的情况下，中心嵌件-盆体界面的应力分布是影响特高压 GIL 盆式绝缘子力学性能的关键因素，界面上三结合点的应力集中是造成绝缘子水压破坏的主要原因。提出的不改变盆体结构只优化中心嵌件的方案，利用金属凸起部分的阻挡作用降低三结合区的应力，而不影响绝缘子的电场分布和盆体表面的应力分布，兼具经济性和可靠性。

2）应力释放槽越深，距离中心嵌件外缘越近，三结合点的应力值越低，但应适当考虑应力释放槽宽度以便机械加工。在三结合区用倒角过渡线替代中心嵌件与盆体垂直连接，可调控消除三结合点处应力最大的现象。优化后，单位水压载荷时三结合点应力值从 24.08 MPa 降低到 1.70 MPa，降低了92.94%，机械性能显著提高，电场强度几乎不变。

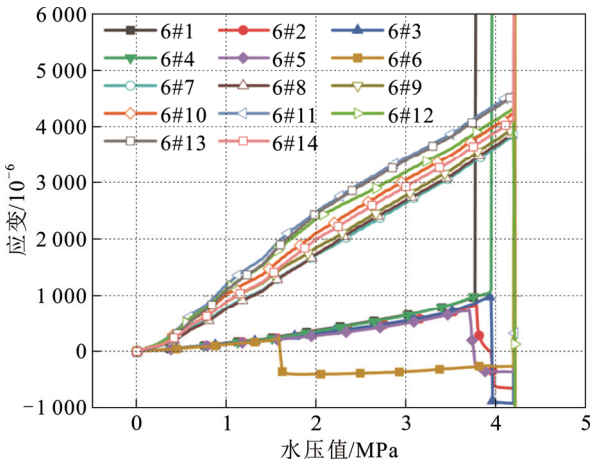


图 15 6 号绝缘子的应变曲线

Fig.15 Stress curve of No.6 basin insulator

表 2 优化结构的电气性能试验结果

Table 2 Electrical performance test results of optimized structure

编号	电气性能试验结果			局放量/pC
	水压试验	雷电冲击试验	工频耐受试验	
1	通过	通过	通过	0.53
2	通过	通过	通过	0.81
3	通过	通过	通过	1.29
4	通过	通过	通过	0.86
5	通过	通过	通过	0.83

3）试验表明，在工艺良好的情况下，优化的绝缘子可耐受 4.5 MPa 以上的水压值，且通过了雷电冲击、工频耐压和局部放电试验验证，验证了该中心嵌件结构的合理性和可行性。此外，绝缘子的性能受到结构、材料和工艺等多方面影响，在生产制造环节应提高界面涂覆材料的耐高温性能和粘接强度。

4）通过结构分析对比、关键参数优化，得到了机械和电气性能相对优异的结构，在水压、绝缘试验基础上可做更进一步的测试评估并在工程中推广应用。

参考文献 References

[1] KOCH H. Gas insulated transmission lines[M]. Chichester, United Kingdom: Wiley-IEEE Press, 2012: 33-38.

[2] 张长虹，张博雅，李明洋，等. 高压直流 GIL 设备绝缘关键技术研究综述[J]. 高电压技术，2023，49(3)：920-936.
ZHANG Changhong, ZHANG Boya, LI Mingyang, et al. Review of key insulation technologies of HVDC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 920-936.

[3] 陈 允，崔博源，王宁华，等. 1 100 kV 盆式绝缘子改善机械强度的研究[J]. 高压电器，2015，51(7)：52-56，62.
CHEN Yun, CUI Boyuan, WANG Ninghua, et al. Study of improving

mechanical strength for 1 100 kV spacer insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 52-56, 62.

[4] 姚永其，王之军，陈　圣，等. 550 kV GIL 盆式绝缘子及其组件结构优化设计[J]. 高压电器，2021，57(5)：50-57.
YAO Yongqi, WANG Zhijun, CHEN Sheng, et al. Optimization design on insulating spacer and its assembly structure of 550 kV GIL[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5): 50-57.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 贾云飞，高　璐，汲胜昌，等. 基于有限元仿真和遗传算法的 1 100kV 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.

[8] 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(7)：1847-1855.
WANG Chao, LI Wendong, CHEN Tairan, et al. Compact design of 550 kV basin-type spacer in gas insulated switchgear (part I) -- structure optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1847-1855.

[9] 李文栋，王　超，陈泰然，等. 550 kV GIS 盆式绝缘子小型化设计(二)——介电分布优化[J]. 电工技术学报，2022，37(11)：2743-2752.
LI Wendong, WANG Chao, CHEN Tairan, et al. Compact design of 550 kV basin-type spacer in gas insulated switchgear (part II)——dielectric distribution optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2743-2752.

[10] 张维凯，孙　强，葛延鹏，等. 基于 NSGA-Ⅱ算法的 GIS 隔离开关盆式绝缘子电场分布和机械性能综合优化[J]. 高电压技术，2025，51(1)：336-345.
ZHANG Weikai, SUN Qiang, GE Yanpeng, et al. Integrated optimization of electrical field distribution and mechanical performance of basin-type insulator in GIS disconnector based on NSGA-Ⅱ[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 336-345.

[11] 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.

[12] 张国宝，杨　为，赵恒阳，等. 基于 X 射线三维成像技术的在役 GIS 盆式绝缘子缺陷检测[J]. 高压电器，2022，58(10)：230-236.
ZHANG Guobao, YANG Wei, ZHAO Hengyang, et al. Defect detection on operating insulation spacer of GIS based on 3D X－ray digital imaging technology[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 230-236.

[13] XING Y Q, WANG Z W, LIU L, et al. Defects and failure types of solid insulation in gas-insulated switchgear: in situ study and case analysis[J]. High Voltage, 2022, 7(1): 158-164.

[14] 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.

[15] 费龙菲，龚晓燕，陈　维. GIS/GCB 用三相盆式绝缘子水压强度的影响因素分析[J]. 高压电器，2014，50(4)：125-130.
FEI Longfei, GONG Xiaoyan, CHEN Wei. Factors influencing the water pressure of insulating spacer in GIS/GCB[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 125-130.

[16] 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(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 1 100 kV GIS[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2019, 35(2): 155-162.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 刘　鹏，张语桐，吴泽华，等. ±320 kV 直流 GIL 微粒陷阱关键结构参数分析及优化[J]. 高电压技术，2023，49(11)：4695-4706.
LIU Peng, ZHANG Yutong, WU Zehua, et al. Key parameter analysis and structure optimization of particle trap in ±320 kV DC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4695-4706.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 中国电力企业联合会. 交流气体绝缘金属封闭输电线路用绝缘子技术规范：T/CEC 604—2022[S]. 北京：中国电力企业联合会，2022.
China Electricity Council. Specifications for insulator used in AC gas-insulated metal-enclosed transmission line: T/CEC 604—2022[S]. Beijing, China: China Electricity Council, 2022.



朱思佳
1995—，女，博士生
主要从事 GIL 绝缘关键技术研究工作
E-mail: sidrazhu@stu.xjtu.edu.cn

ZHU Sijia
Ph.D. candidate



刘　鹏(通信作者)
1979—，男，博士，教授，博导
研究方向为电力设备电气绝缘的研究工作
E-mail: pengliu@xjtu.edu.cn

LIU Peng
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2024-05-29　修回日期　2024-11-04　　编辑　曹昭君