

220 kV 高压电缆接头保护装置端头部位的折线形设计与测试

崔江静¹, 刘真², 仇炜¹, 黄顺涛¹, 杨鑫², 钟淼龙², 孙浩天²

(1. 广东电网有限责任公司珠海供电局, 广东 珠海 519000; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:针对现有的高压电缆接头防爆装置在端头部位普遍存在的应力集中问题, 提出通过优化折线偏折角度和法兰尺寸的方法, 均衡保护装置端头部位应力分布。利用温度场、流场和位移场耦合的有限元计算方法, 对不同结构下 220 kV 金属型高压电缆接头防爆壳体端头部位内壁承受的应力进行计算, 得到内部端头处的压力分布。通过仿真分析, 结合保护装置实用性和经济性进行综合考虑, 最终选取 220 kV 金属型高压电缆接头防爆装置端头部位折线偏折角度 α 为 60° ; 在端头和壳体连接处增加法兰, 确定其最优结构为法兰的高度为 50 mm, 厚度为 20 mm, 最终使保护装置内壁应力畸变系数降低至 1.48。通过折线形端头的 220 kV 高压电缆接头防爆装置的爆破应力测试, 验证设计方法的可靠性。通过对比折线型端头结构和弧度型端头结构, 认为在相同的技术条件下, 折线型端头结构具有更好的经济效益。为防爆装置设计提供可靠的理论计算方法。

关键词:高压电缆接头; 防爆装置; 端头结构优化; 仿真设计; 爆破应力测试

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.06.011 中图分类号: TM757 文章编号: 1673-9140(2021)06-0094-10

Folding line design and test for the front part of joint metal protective device on 220 kV high-voltage cable

CUI Jiangjing¹, LIU Zhen², QIU Wei¹, HUANG Shuntao¹,
YANG Xin², ZHONG Miaolong², SUN Haotian²

(1. Zhuhai Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhuhai 519000, China; 2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Aiming at the stress concentration problem existing in the front part of the high-voltage cable joint protective device, this paper presents a method to balance the stress distribution by optimizing the deflection angle of the folding line and the flange size. Finite element method of temperature field, flow field and displacement field coupling is adopted to calculate the stress value of the front part of joint protective device inner cavity on the 220 kV metal cable under different structure. Thus, the stress distribution of protective inner cavity is obtained. Through simulation analysis, combined with the practicability and economy of the protective device, the final chosen deflection angle α of the 220 kV metal cable joint explosion proof device folding line on the front part is 60° . The optimal structure of the

收稿日期: 2019-04-09; 修回日期: 2019-10-21

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51407013); 广东电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20161905)

通信作者: 刘真(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事高电压绝缘技术研究; E-mail: 491329562@qq.com

flanges added at the front-to-shell connections is determined as 50 mm in height and 20 mm in width, which can reduce the stress distortion coefficient of the inner wall of the protective device to 1.48. The reliability of the design method is verified by the explosion stress test of the protective device of 220 kV high-voltage cable joint with broken line terminal. By comparing the polygonal structure to the curved structure, it is considered that under the same technical conditions, the polygonal structure has better economic benefits. The paper provides a reliable theoretical calculation method for the design of the protective device.

Key words: high-voltage cable joint; explosion-proof device; structural optimization of front part; simulation design; blasting strain test

由于结构复杂,需现场安装且安装工艺参差不齐,导致高压电缆接头成为高压电力电缆运行的薄弱环节。据统计,70%以上的电缆故障出现在接头部位^[1-2]。当高压电缆接头发生绝缘击穿故障时,电弧将在绝缘击穿通道内释放巨大能量,导致电缆接头发生烧毁、爆炸事故。电缆接头爆炸释放的冲击波或碎片会对周围其他电力设施及运维人员造成巨大伤害。因而,需要在高压电缆接头处加装防爆装置,以避免电缆接头爆炸而引起的二次伤害。

目前,市场上已开发一系列高压电缆接头防爆装置,以降低此爆炸事故带来的危害^[3]。但这些防爆装置,尤其是在其端头部位,都存在内部压力不均衡的问题。当电缆接头发生爆炸时,巨大的电弧能量对保护装置内部产生的冲击力分布将在端头处产生畸变,造成端头某些部位承受的冲击应力远大于其他部位,使得端头部位更容易被炸裂,从而影响保护装置防爆效果。对现行市场常见的电缆接头防爆壳体进行试验测试,结果表明:在电缆接头爆炸后,接头保护装置主体部分仍较为完整,而端头部位被严重破坏,出现碎片飞溅的现象,如图 1 所示。因而,需要对防爆装置端头部位形状进行合理的设计,以均衡爆炸时装置内部的冲击应力。



图 1 爆炸现场实物

Figure 1 Physical view of the blast site

由于短路电弧的能量更大,对输电电压等级的高压电缆接头防爆装置普遍采用金属外壳(大多为铝镁合金),且为分段式结构,即包含中间本体部分和两端的端头部分。目前,高压电缆接头防爆装置端头部位结构大多仅凭厂家经验设计,没有均衡端头部位内壁冲击波压力分布的措施。通常需要增加防爆装置端头部位的厚度,才能达到防爆效果^[4]。采用具有一定的弯曲弧度的端头形状,是均衡装置内部应力分布的有效办法。但对高压电缆接头防爆装置来说,采用弧度设计会明显增加加工过程中的困难程度及制造成本。另外,弧度设计将增加端头部位的长度,可能收到防爆装置实际安装条件的限制,可行性较低。

由以上分析可知,端头部位的弧形设计存在加工、使用以及成本方面的问题;折线形设计又必然会有顶点,压力分布会在该点处集中。但在折角顶点处采用法兰连接,相当于进行了结构局部加强,会使得该点处的应力值下降。因而,通过对端头部位折线偏折角度以及与保护装置本体连接的法兰高度和壁厚的设计,可以解决折线型设计内壁压力分布在折角处集中的问题。

该文基于热—流体—应力多物理场耦合的原理,采用 COMSOL 有限元计算软件,对 220 kV 高压电缆接头防爆装置端头部位采用折线型设计。设计不同的端头部位折线偏折角度以及与保护装置本体连接的法兰高度和壁厚,计算各种情况下金属型防爆装置内壁应力分布,通过对防爆装置进行爆破测试,验证端头部位的应力优化效果。比较折线型端头结构和弧度型端头结构的技术经济性,为防爆装置的端头设计提供理论以及和方法指导。

1 高压电缆接头防爆装置内壁应力分布的多物理场耦合有限元计算方法

1.1 高压电缆接头爆炸过程的多物理场耦合方式

针对多物理场耦合的问题,其关键在于多物理场之间的信息传递问题。而电缆接头短路电弧引起爆炸的问题,其核心是温度场、流体场和应力场相互作用的结果^[5-6]。由于电弧爆炸所引起的温度升高,然后气体膨胀,冲击防爆壳体,因而在壳体上产生应力。由于故障电弧能量主要通过爆炸冲击波对电缆接头和装置本体造成破坏^[7],且短路电流仅流经高压电缆接头内部,因此,该文忽略短路电流产生的电动力,仅考虑电弧爆炸通过气体冲击波作用于保护装置壳体内部产生的应力。

通过以上分析,总结出电缆接头仿真中多物理场之间耦合的作用关系,如图2所示^[8]。

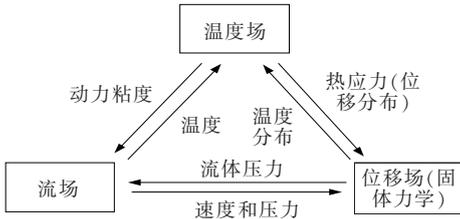


图2 耦合作用形式

Figure 2 Coupling action form

1.2 接头爆炸过程的控制方程、边界条件及耦合方程

1) 温度场控制方程及边界条件。

结合傅里叶传热定律和能量守恒定律,温度场的控制方程为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (1)$$

式中 k 为导热系数; ρ 为材料密度; C_p 为常压热容; Q 为热源。

控制方程(1)说明能量通过热传导的方式由高温区传到低温区的多少与温度在空间的变化率成正相关性,可用于模拟固体或流体的传热。通过对热源、材料的密度、热容和导热系数等进行定义,求解得到仿真模型的温度分布。温度场中的边界条件即最外层设置为物体表面与周围环境进行的对流交换系数,有孔设置为开边界^[9]。

2) 流体场(空气)控制方程及边界条件。

流体动力学中流体运动与惯性力、粘性力和电场力密切相关,这些力影响流体的运动。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u =$$

$$\nabla \cdot [-p \mathbf{i} + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\mu(u \cdot \nabla)\mathbf{i}] + F \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (3)$$

式中 ρ 为材料密度; u 为流体速度; p 为压强; \mathbf{i} 为单位向量; F 为体积力; T 为温度。

控制方程(2)、(3)为描述流体流动的不可压缩 Navier-Stokes 方程,根据温度、密度、气体流速和压强等初始化条件,结合理想气体状态方程,计算得到仿真模型的速度、压强分布。流体场中的边界条件即选择孔的边界条件为出口,其他边界为壁^[10]。

3) 应力场(防爆壳体)控制方程及边界条件。

$$\rho \frac{\partial^2 u \epsilon}{\partial t^2} = \nabla \cdot S + F_v \quad (4)$$

式中 ρ 为材料密度; F_v 为体积力。

控制方程(4)主要用于描述结构变形和求解应力,其边界条件即保护装置的表面设置为壁。

4) 温度—流体—应力场的耦合过程及耦合方程。

温度场和应力场的耦合过程:应力在温度的影响下发生变化,导致固体结构产生形变。而固体结构发生的形变反过来又会影响温度场的数值离散求解区域大小。这一过程的耦合方程为

$$\epsilon_{incl} = \alpha_0 (T - T_{ref}) \quad (5)$$

式中 ϵ 为弹性系数; α_0 为热膨胀系数。说明热变形与材料的热膨胀系数、温度密切相关。

温度场与流场耦合过程:温度会影响流场中材料的相关参数,而流场在变化过程中影响温度传递;流场和应力场耦合过程:空气受热膨胀后对外壁产生压力,使外壁发生形变,反过来又会影响空气的流速^[11-12]。用于描述这一过程的结构力学与流体区域变化方程为

$$\sigma_{solid} \cdot n = \sigma_{fluid} \cdot n \quad (6)$$

其中, σ 为应力。

$$\sigma_{\text{fluid}} = -\rho_{\text{fluid}}L + \mu(\nabla u_{\text{fluid}} + (\nabla u_{\text{fluid}})^T)$$

$$u_{\text{fluid}} = v_{\text{wall}}, v_{\text{wall}} = \frac{\partial u_{\text{solid}}}{\partial t}$$

1.3 220 kV 高压电缆接头防爆装置结构建模

该文以 220 kV 金属型高压电缆接头防爆装置为主要应用对象,给出其端头部位折线型设计方法。根据国内外相关文献^[13-14]以及工程上 220 kV XLPE 绝缘高压交流电缆附件各部位的几何参数,参考国内附件厂家生产附件原型以及材料承受的电场强度,在 COMSOL Multiphysics 仿真软件中按照 1:1 的比例建立二维轴对称仿真模型。

金属型防爆装置采用 5 系铝镁合金材料,防爆装置长度为 2 200 mm,内壁厚度为 460 mm,壁厚为 8 mm,如图 3 所示。由于该文针对端头部位的应力分布进行研究,故在模型搭建时省略壳体上的泄能孔,建立二维轴对称模型。

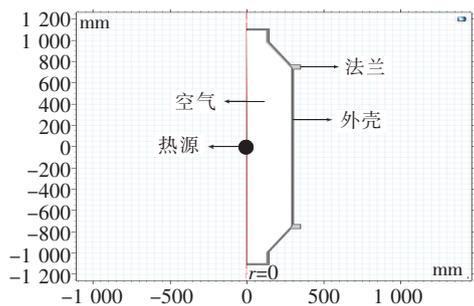


图 3 高压电缆接头保护装置仿真模型

Figure 3 Simulation model of high-voltage cable joint protection device

在前期研究中,对电弧能量采用磁流体动力学方法进行仿真计算,得到高压电缆接头因绝缘击穿产生的大电流电弧的等效热损耗。故该文选择前期计算结果,将 220 kV 高压电缆接头绝缘击穿产生的电弧等效为半径 4.4 mm,位于轴线正中心处的热源球体,选用的电弧能量热损耗密度为 7×10^{15} W/m³。以此数据作为该文仿真的爆炸热源。其他仿真假设可参照文献^[15]。

2 220 kV 电缆接头防爆壳体端头部位的折线形设计

2.1 折线形防爆壳体端头结构的优化设计方法

当防爆壳体端头部位为折线形结构时,高压电

缆接头防爆装置端头部位的结构如图 4 所示。以目前市场上使用过的金属型 220 kV 高压电缆接头防爆壳为原型(初始结构:偏折角度 α 为 45° ,连接法兰处 L 为 40 mm, h 为 15 mm,装置壁厚取 8 mm),按文 1 中所述仿真方法对该防爆壳体的应力分布进行仿真,所得结果如图 5、6 所示。

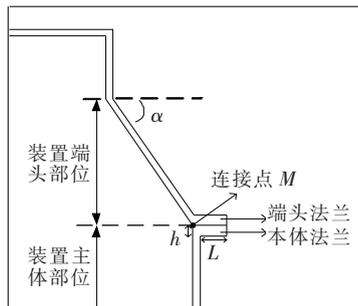


图 4 高压电缆接头保护装置折线形端部结构

Figure 4 High-voltage cable joint protective device folding line front part structure diagram

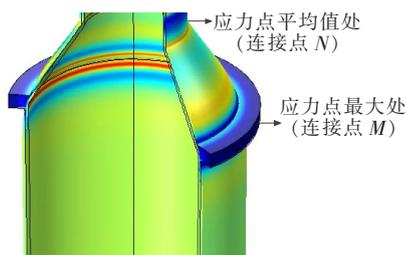


图 5 三维保护装置应力分布

Figure 5 Three-dimensional protective device stress distribution sketch map

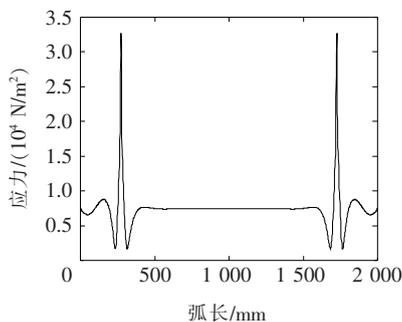


图 6 装置内壁应力分布

Figure 6 Stress distribution of device inner wall

由图 5、6 可知:①防爆壳体内壁应力畸变最明显的位置为保护装置端头与本体的连接处,即连接点 M;最大应力值 P_M 也出现在连接点 M 处,达到 $33\,296\text{ N/m}^2$;②以初始结构为例,仿真得到的装置连接点 N 处的应力值为 $7\,018\text{ N/m}^2$,计算得到的

装置壳体内部的平均应力值 P_{avg} 为 $7\ 051\ \text{N/m}^2$, 与连接点 N 位置处的应力值近似, 因此, 认为可以用靠近电缆出口处的端头点位的应力值反映防爆壳体的平均应力值; ③将最大应力值 P_M 与壳体平均应力值 P_{avg} 之比定义为应力的畸变系数 k , 可得该防爆壳体的应力畸变系数 $k = 4.72$ 。为降低应力畸变系数, 需要对折线形结构展开优化设计。

当接头故障时, 短路电弧释放的能量通过气流作用于防爆壳体, 在壳体上产生应力。当壳体承受的应力超过壳体材料的断裂应力时, 壳体将会发生破裂。壳体承受应力的大小除与气流冲击力有关外, 还与壳体厚度有关, 即在壳体折线顶点处采用加强结构(如加厚的法兰), 可起到缓解壳体内部应力分布的作用。另一方面, 不同的折线偏折角度 α 也会改变壳体的最大应力值。

因此, 在分析 220 kV 高压电缆接头防爆装置结构特点及壳体承受应力变化特点的基础上, 针对端头折线结构在折角处应力集中的问题, 提出优化端头部位应力分布的折线形设计。设计点和设计方法如下。

1) 防爆装置端头部位折线的偏折角度 α 。

通过选取不同的折线角度 α , 按照多物理场耦合的有限元仿真方法得出在相同电弧能量下, 得到防爆装置端头部位内壁应力分布, 并提取其最大应力值; 通过数据处理得到偏折角度与防爆壳体端头部位最大应力值的关系曲线; 综合壳体应力分布结果和实际条件要求, 得到最优化的偏折角度 α 。

2) 防爆装置端头部位与中间壳体在连接点 M 处法兰的厚度 h 和宽度 L 。

在连接点 M 处采用加厚的法兰, 可以有效缓解该处的应力集中现象。因为防爆装置采用分段式结构, 实际结构下连接点 M 处的本体法兰和端头法兰通过螺栓连接。在保证足够大的螺栓连接强度下, 仿真中可把 2 块法兰作为一个整体。

针对连接法兰的结构, 通过设计不同的法兰厚度 h 和宽度 L , 分别进行仿真, 得到端头部位最大应力值(连接点 M 处)和端头部位内壁的平均应力值, 从而选择使应力分布最均衡的法兰结构。

目前, 金属型防爆装置都装有泄能孔以及对应的开口方式^[16-19]。以双侧开口型防爆装置为例, 该项目组设计弹簧拉紧式泄能孔, 如图 7 所示。



图 7 保护装置实物

Figure 7 Physical drawing of protective device

泄能孔的盖板被弹簧拉紧, 起到防水以及减少爆炸喷溅物的作用。当出现短路电弧时, 保护装置内部压力达到一定程度时, 弹簧拉紧式泄能孔的盖板被冲开, 泄能孔开始发挥泄能作用, 降低装置内部压强。通过仿真计算, 在电缆接头短路电弧出现后, 腔体泄能孔上盖板处的气体压力随时间的变化关系如图 8 所示。

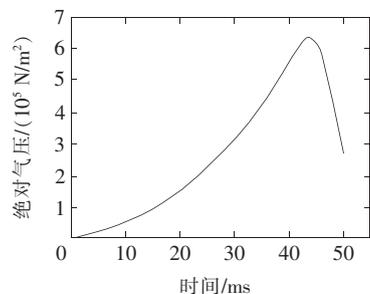


图 8 防爆装置泄能孔上盖板处气压变化过程

Figure 8 Pressure change process at the upper cover on the venting hole of the protective device

由图 8 可知, 当 $t = 40\ \text{ms}$ 时, 保护装置的弹簧拉紧式泄能孔的盖板被冲开, 泄能孔开始发挥泄能作用, 装置内部压强迅速下降。即直到泄能孔被冲开时, 壳体内的气体压强达到最大。为留有一定的裕度, 将壳体保持密封的时间设置为 $70\ \text{ms}$, 即取仿真时间点 $t = 70\ \text{ms}$ 时保护装置壳体上的应力值作为装置设计的依据。

2.2 防爆装置端头处偏折角度 α 的确定

当选取不同折线偏折角度 α 且在连接点 M 处不加法兰时, 按照多物理场耦合的有限元仿真方法, 计算在相同电弧能量下防爆装置端头部位内壁应力

分布,并提取其最大应力值。由仿真结果可知,最大应力均出现在连接点 M 处。仿真得到不同的折线偏折角度 α 与防爆装置端头部位最大应力值(连接点 M 处的应力值)的关系曲线,如图 9 所示。

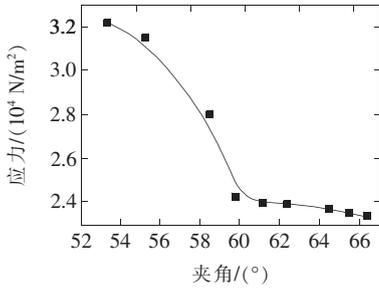


图 9 防爆装置端头部位折线偏折角度与最大应力值的关系曲线

Figure 9 Curve of relationship between deflection angle of folding line and maximum stress value at the front part of explosion proof device

由图 9 可知,当防爆装置端头部位折线偏折角度 α 越大时,最大应力值 P 越小。当折线偏折角度 $\alpha < 60^{\circ}$ 时,随着 α 的增加,最大应力 P 随之下降,且下降速率明显;当折线偏折角度 $\alpha > 60^{\circ}$ 时,随着 α 的不断增大,最大应力 P 同样随之下降,但下降速度缓慢。

根据仿真结果,当偏折角度 α 分别为 55° 、 60° 和 65° 时,端头部位的最大应力值分别为 31 948、24 584 和 23 776 N/m^2 。可见,相对于偏折角度 α 为 55° 时,偏折角度 α 为 60° 时最大应力值下降了 23.0%,偏折角度 α 为 65° 时最大应力值仅下降了 25.6%。说明当折线偏折角度 α 大于 60° 时, α 的增加对改善应力分布的效果将极不明显。

另一方面,从高压电缆接头的应用实际条件及制造成本来看,端头部位都不宜设计过长。折线偏折角度 α 越大,端头部位的长度需要越长。因此,综合考虑保护装置的实用性、安全性和经济性,最终选取端头部位的折线偏折角度 α 为 60° 。

2.3 端头与本体连接法兰的结构设计

在实际应用中,当 220 kV 电缆接头防爆装置壁厚为 8 mm 时,连接法兰厚度 h 通常为 15~20 mm,宽度 L 通常为 40~50 mm。为达到降低壳体应力的最优效果,仿真中选择 5 组典型的法兰尺寸进行计

算,分别为法兰 1($L=40.0$ 、 $h=15.00$ mm),法兰 2($L=42.5$ 、 $h=16.25$ mm),法兰 3($L=45.0$ 、 $h=17.50$ mm),法兰 4($L=47.5$ 、 $h=18.75$ mm)和法兰 5($L=50.0$ 、 $h=20.00$ mm)。

当 $t=70$ ms 时,按该文提出的仿真方法进行计算,在折线偏折角度 α 为 60° 时,得到不同尺寸的法兰对应的端头部位最大应力值 P_M 与壳体平均应力值 P_{avg} ,如图 10 所示,可见法兰尺寸越大,防爆装置端头部位的应力最大值 P_M 越小,而壳体平均应力值基本不变。将最大应力值 P_M 与壳体平均应力值 P_{avg} 之比定义为应力的畸变系数 k ,可得不同尺寸的法兰对应的 k 值,如表 1 所示。

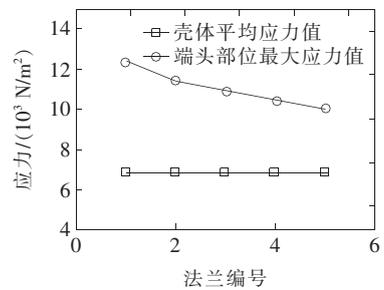


图 10 不同法兰结构下端头部位的应力特征值

Figure 10 Stress characteristic values for the front part of different flange structures

表 1 不同尺寸的法兰对应的应力特征值

Table 1 Stress characteristic values corresponding to flanges of different sizes

法兰组数	应力最大值/ (N/m^2)	壳体平均应力值/ (N/m^2)	k 值
1	12 353	6 826.2	1.81
2	11 385	6 844.3	1.67
3	10 887	6 793.9	1.60
4	10 378	6 795.2	1.53
5	10 012	6 777.1	1.48

由表 1 可得,当选择法兰 5($L=50.0$ 、 $h=20.00$ mm)时,应力的畸变系数 $k=1.48$ 为最小值。因此,最终选择法兰 5。

2.4 220 kV 高压电缆接头防爆装置折线型端头优化结构

通过对折线的偏折角度和法兰的设计,最终确定 220 kV 高压电缆接头防爆装置折线型端头优化

结构,如图 11 所示。最终采用的端头结构:折线偏折角度为 60° ,折线顶点的连接法兰 $L=50.0$ 、 $h=20.00$ mm,腔体内的应力畸变系数 k 降至 1.48。

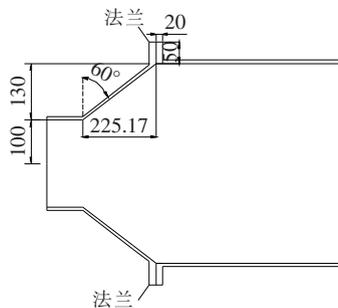


图 11 折线型端头的结构(单位:mm)

Figure 11 Structure diagram of the broken line front part structure(Unit:mm)

3 220 kV 金属型高压电缆接头保护装置折线型端头设计的爆炸应力测试

3.1 试验装置及试验方法

为了检验 220 kV 高压电缆接头保护装置的折线形优化设计是否合理,按照图 10 设计的端头部位结构进行加工。220 kV 高压电缆接头保护装置采用 5 系铝镁合金材料,保护装置内置截面为 $2\,500\text{ mm}^2$ 的 220 kV 电缆及成套电缆接头装置。试验现场布置如图 12 所示。



图 12 高压电缆接头保护装置爆前示意

Figure 12 High-voltage cable joint protective device pre-explosion diagram

采用炸药爆破以测量壳体上冲击应力的方法进行端头部位的压力分布测试。在江苏盱眙 925 厂野外试验场进行试验,选用散装 8701 炸药 100 g 作为试验爆源,试验中采用应变花测量保护装置在爆炸作用下产生的动态应变,并利用压电式冲击波压力

传感器测量爆炸产生的冲击波压力大小。应变花安装和安装实物分别如图 13、14 所示。点位 1 为壳体最大应力分布位置,点位 2 为壳体平均应力分布位置。

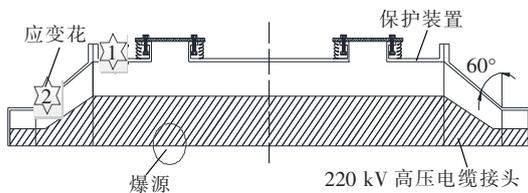


图 13 应变花安装

Figure 13 Strain tester installation diagram

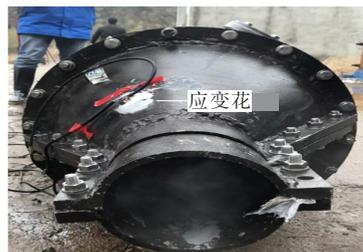


图 14 应变花安装实物

Figure 14 Strain tester installation physical drawing

3.2 试验过程及结果

高压电缆保护装置爆破试验现场观察到的现象:在 100 g 的 8701 炸药作用下,保护装置可正常泄能,爆炸冲击波过后壳体无任何损坏。经高速相机拍摄的实验结果如图 15 所示。



图 15 实验结果

Figure 15 Test result

一般情况下,应变花能够测量应力待测部件 3 个方向的应变情况。因此,测量得到 100 g 的 8701 炸药爆炸冲击对壳体上点位 1、2 的应变结果和计算得到应力畸变系数 k ,如表 2 所示,可知在采用该文所设计的折线形端头结构后,试验得到的应力畸变系数和仿真结果基本相符。证明该文对 220 kV 高压电缆接头保护装置端头部位的优化折线形设计是可靠的。

表 2 端头典型点位应变测试结果

Table 2 Test result of typical positions in cable terminal

测量点位	应力/(N/m ²)		
	轴向	环向	斜 45°方向
1	3 502.33	11 271.65	466.71
2	2 350.56	7 773.55	317.49
畸变系数 <i>k</i>	1.49	1.45	1.47

4 技术经济效益对比

4.1 优化的折线形端头和初始折线形端头的技术经济对比

按 220 kV 高压电缆接头保护装置的初始端头设计(偏折角度 α 为 45° , 连接法兰处 $L = 40.0$ 、 $h = 15.00$ mm)计算, 如文 2.1 中所得结果, 壳体的应力畸变系数为 4.72。优化的 220 kV 高压电缆接头保护装置的端头设计(偏折角度 α 为 60° , 连接法兰处 $L = 50.0$ 、 $h = 20.00$ mm), 壳体的应力畸变系数为 1.48。可见, 在技术上优化的端头设计防爆性能得到明显改进。

在经济方面, 初始结构的端头部位收缩部分的长度比优化后的短 76 mm, 该长度相对于 220 kV 高压电缆接头保护装置本体长度(两侧端头法兰之间的距离, 该设计为 2 600 mm)占比极少; 连接法兰的尺寸略有变动。可见, 初始结构的端头结构在经济成本上并没有很大优势, 但优化后的端头结构在防爆性能上却得到明显提高。因而, 优化后的端头结构具有明显的综合技术经济优势。

4.2 优化折线型和弧度型端头结构的技术经济对比

保护装置端头部位的弧度型设计与折线型设计相比, 关键在于连接点 M 处设计为圆弧形。文献[15]给出了弧度型端头结构, 如图 16 所示。

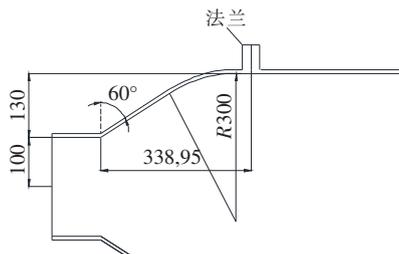


图 16 弧度型端头结构(单位: mm)

Figure 16 Structure diagram of radial type end(Unit: mm)

如果在连接点 M 处设计成弧度结构, 关键在于确定弧度的最佳曲率半径。此时端头法兰和本体法兰平直对接, 不存在角度问题, 故在法兰连接处不存在应力畸变问题。文献[15]通过计算发现, 当曲率半径大于 0.3 m 时, 腔体内壁的最大应力值下降的程度及其微小, 故端头部位的曲率半径取 0.3 m。

为了进一步比较分析, 按文献[15]所示模型和参数, 在不同圆弧曲率半径下, 计算保护装置腔体内壁的最大应力值、平均应力值和应力畸变系数 k , 计算结果如表 3 所示。

表 3 不同曲率半径的圆弧对应的应力特征值

Table 3 Stress characteristic values corresponding to arcs with different radiuses of curvature

圆弧的曲率半径/m	应力最大值/(N/m ²)	壳体平均值/(N/m ²)	<i>k</i> 值
0.10	18 600.4	7 850.4	2.37
0.15	14 000.3	7 808.8	1.72
0.25	11 480.7	7 548.2	1.52
0.30	10 420.5	7 340.8	1.42
0.50	9 872.1	7 235.2	1.36

由表 3 可知, 当连接点 M 处采用曲率半径为 0.30 m 圆弧结构时, 腔体内壁的应力畸变系数 k 降至 1.42。继续增大曲率半径, 畸变系数 k 的下降并不明显。

比较表 1~3 的数据可知, 腔体内壁的最大应力值、平均应力值和应力畸变系数均与采用优化后的折线型结构相仿, 在技术上达到了相同的效果。

然而, 比较图 11、16 所示折线型端头结构和弧度型端头结构可得: ①在相同的保护装置本体、端部收缩口径(200 mm)和端头部位壁厚(8 mm)下, 折线型端头长度为 225.17 mm, 弧度型端头长度为 338.95 mm, 弧度型端头比折线型端头长 50.53%, 增加了材料的用量; ②端头部位设计为弧度形时会明显增加加工制作的难度和成本。因而, 从经济效益分析, 该文设计的折线型端头具有更好的经济效益。

5 结语

相对于目前金属性高压电缆防爆装置端头凭借

经验的折线型和弯曲弧度设计,本文为高压电缆接头防爆装置端头连接部位的设计提供了优化折线形设计方法。

1)利用温度场、流场和位移场耦合的有限元计算方法,采用3层迭代算法,得到了防爆腔体内部不同时刻腔体内壁承受的应力值。针对折线形设计在顶点处产生应力畸变的问题,采用通过优化折线偏折角度和法兰尺寸的方法均衡保护装置端头部位应力分布。

2)通过仿真计算,折线形端头结构选取端头部位折线偏折角度 α 为 60° ,此时装置端头部位的最大应力优化效果最为明显;另外,在端头和壳体连接处增加法兰($L=50.0$ 、 $h=20.00$ mm),可使保护装置内壁应力畸变系数降低至1.48,有效降低壳体承受的应力。

3)通过爆破试验对爆炸过程中端头部位产生的应力变化情况进行测试,通过对不同点位测量得到的爆炸应力结果进行计算分析,得到应力畸变系数 k 。对仿真和试验得到的应力畸变系数进行分析比较,结果表明:试验得到的应力畸变系数和仿真结果基本相符,说明该文采用的折线形端头优化设计方法是准确可靠的。

4)通过对比初始、优化折线型端头结构和弧度型端头结构,认为优化折线形端头部位具有较低的应力畸变系数,防爆性能较好;在相同的技术条件下,优化折线型端头结构具有更好的经济效益。

参考文献:

[1] 王华楠,王霞,余栋,等. 110 kV 电缆中间接头的合闸过电压仿真研究[J]. 高压电器,2021,57(7):127-134.
WANG Huanan, WANG Xia, YU Dong, et al. Study on closing overvoltage simulation of 110 kV cable intermediate joint[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 127-134.

[2] 张丹丹,苏小婷,景晓东,等. 基于阻抗谱的同轴电缆故障及中间接头定位实验研究[J]. 高压电器,2021,57(7):92-97+104.
ZHANG Dandan, SU Xiaoting, JING Xiaodong, et al. Experimental study on coaxial cable faults and interme-

mediate joints location based on impedance spectrum[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 92-97+104.

[3] 郑建康,刘素蓉,蒲路,等. 电力电缆带电燃烧的数值模拟技术研究进展[J]. 智慧电力,2020,48(10):105-112.
ZHENG Jiankang, LIU Surong, PU Lu, et al. State of the art of combustion behavior of live power cables[J]. Smart Power, 2020, 48(10): 105-112.

[4] MENG Tao, LIN Xin, XU Jianyuan. The effect of GIS apparatus parameter on very fast transient over-voltage [C]//International Conference on High Voltage Engineering and Application, Chongqing, China, 2008.

[5] 马星河,张登奎,朱昊哲,等. 基于 EWT 的高压电缆局部放电信号降噪研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(23):108-114.
MA Xinghe, ZHANG Dengkui, ZHU Haozhe, et al. Research on noise reduction of a partial discharge signal of a high voltage cable based on EWT[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 108-114.

[6] 陈维江,颜湘莲,王绍武,等. 气体绝缘开关设备中特快速瞬态过电压研究的新进展[J]. 中国电机工程学报,2011,31(31):1-11.
CHEN Weijiang, YAN Xianglian, WANG Shaowu, et al. Recent progress in investigations on very fast transient overvoltage in gas insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 1-11.

[7] 万航,周凯,刘力. 老化中压电缆复合界面的放电特性研究[J]. 电测与仪表,2020,57(15):14-18.
WAN Hang, ZHOU Kai, LIU Li. Study on discharge characteristics of aging medium voltage cable composite interface[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(15): 14-18.

[8] Guardado J L, Maximov S G, Melgoza E, et al. An improved arc model before current zero based on the combined mayr and cassie arc models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 138-142.

[9] Jamali-Abnavi Ahmadreza, Hashemi-Dezaki Hamed. Evaluating the electromagnetic forces on the electric arc furnaces' power cables under various operation conditions[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 201: 107553.

[10] 戚星宇,刘林旭,吕志鹏,等. 新型的电缆局部放电在线

- 监测系统研究[J]. 供用电, 2020, 37(1): 51-55.
- QI Xingyu, LIU Linxu, LV Zhipeng, et al. Research on a new online monitoring system for partial discharge of cables[J]. *Distribution & Utilization*, 2020, 37(1): 51-55.
- [11] 林莘, 王娜, 徐建源. 动态电弧模型下特快速瞬态过电压特性的计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 157-164.
- LIN Xin, WANG Na, XU Jianyuan. Calculation and analysis of very fast transient over-voltage characteristic on the condition of dynamic arcing model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(16): 157-164.
- [12] 李兴文, 陈德桂. 空气开关电弧的磁流体动力学建模及特性仿真[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 31-37.
- LI Xingwen, CHEN Degui. Magnetohydrodynamics modeling and characteristics simulation of air switching arc[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(21): 31-37.
- [13] 程鹏. 电缆接头内部缺陷下的电磁—热—力特性及表征方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [14] Kumar V V, Joy Thomas M, Naidu M S. Influence of switching conditions on the VFTO magnitudes in a GIS[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2001, 16(4): 539-544.
- [15] 胡明, 刘淑军, 杨建军, 等. 挤包绝缘高压直流电缆应用现状与研究展望[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 42-55.
- HU Ming, LIU Shujun, YANG Jianjun, et al. Application status and research prospects of HVDC extruded cables[J]. *Electric Power*, 2021, 54(4): 42-55.
- [16] Cassie A M. The orienovelle des arc deruptureetdelaririgidite des circuit[C]//CIGRE, Ohio, US, 1939.
- [17] 戴敏, 谷定燮, 孙岗, 等. 特高压气体绝缘开关设备特快速瞬态过电压的试验回路研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 28-37.
- DAI Min, GU Dingxie, SUN Gang, et al. Study on full-scale 1 000 kV gas insulated switchgear test circuit for very fast transient overvoltage[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(31): 28-37.
- [18] Riechert U, Neumann C, Hama H, et al. Very fast transient overvoltage (VFTO) in gas-insulated UHV substations[R]. Paris: CIGRE, 2010.
- [19] 黄祖光, 朱安平, 王凯, 等. 基于 Dijkstra 算法的电缆敷设系统设计及实现[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(6): 105-110.
- HUANG Zuguang, ZHU Anping, WANG Kai, et al. Design and implementation of cable laying system based on Dijkstra algorithm[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(6): 105-110.