

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201909011



# 冷缩式电缆中间接头附件参数的有限元法优化

方瑞明<sup>1,2</sup>, 尚波宇<sup>1,2</sup>

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 福建省电机控制与系统优化调度工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为了研究冷缩式电缆中间接头的电场分布并对其结构参数进行优化, 首先, 建立电缆中间接头的有限元仿真模型; 然后, 利用该模型对中间接头的结构参数配合进行分析; 最后, 根据分析结果制作一个 10 kV 冷缩式电缆中间接头, 并对该样本开展局部放电和耐压试验。仿真与试验结果表明: 通过合理优化应力锥和屏蔽管的结构参数, 当应力锥的轴向长度、端部曲率半径及厚度分别为 65, 25 和 2.5 mm, 屏蔽管长度和端口形状的分别为 170 mm 和 90°, 应力锥与屏蔽管之间的距离为 60 mm, 中间接头本体长度为 420 mm 时, 样品的最大场强和最大切向场强小于 30 kV · cm<sup>-1</sup> (空气击穿场强) 且其交界面上的电场分布较为均匀; 其可通过局放与耐压试验, 满足设计要求, 为 10 kV 冷缩式中间接头的合理设计提供理论依据。

**关键词:** 冷缩式电缆; 交联聚乙烯; 电场强度; 屏蔽管; 应力锥; 有限元分析

中图分类号: TM 247.06

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2020)04-0518-07

## Finite Element Method Optimization of Attachment Parameters of Cold-Shrinkable Cable Intermediate Joint

FANG Ruiming<sup>1,2</sup>, SHANG Boyu<sup>1,2</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Electric Machinery Control and System Optimal Dispatching

Engineering Technology Research Center, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to study the electric field distribution and optimize the structural parameters of the cold-shrinkable cable intermediate joint, the finite element simulation model of the cable intermediate joint is established firstly, and then the structural parameters matching of the intermediate joint is analyzed by using the model. Finally, a 10 kV cold-shrinkable cable intermediate joint is made according to the analysis results and the sample was made the discharge and voltage withstand test. The simulation and test results show that: By reasonable optimizing the structural parameters of stress cone and shielding tube, when the axial length, curvature radius and thickness of stress cone are 65, 25 and 2.5 mm respectively, the length and shape of shielding tube are 170 mm and 90° respectively, the distance between stress cone and shielding tube is 60 mm, and the length of intermediate joint body is 420 mm. The maximum field strength and tangential field strength of the sample are less than 30 kV · cm<sup>-1</sup> (air breakdown field strength) and the electric field distribution on the

收稿日期: 2019-09-10

通信作者: 方瑞明(1972-), 男, 教授, 博士, 主要从事电气设备在线监测与故障诊断、可再生能源发电及其并网控制的研究。E-mail: fangrm@126.com.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2019J01054); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(17014082005)

interface is more uniform. The design requirements can be met by partial discharge and voltage withstand test, which provides a theoretical basis for the reasonable design of 10 kV cold shrinkage intermediate joint.

**Keywords:** cold-shrinkable cable; XLPE; electric field strength; shielded tube; stress cone; finite element analysis

冷缩式电缆附件在电缆线路中扮演着衔接、过渡等重要角色,是保证电力系统可靠运行不可或缺的组成部分<sup>[1-2]</sup>.由于电缆接头内部结构复杂、材料各异,容易产生电场畸变<sup>[3-4]</sup>,已成为电缆输电线路的薄弱环节和运行故障的典型部位.要提高电缆接头系统的运行可靠性,不仅要保证电缆接头系统现场制作工艺的规范性,而且制造现场的环境条件(如湿度等)应符合要求<sup>[5]</sup>.更重要的是,要对电缆附件进行优化设计以提高产品的设计质量.

冷缩式电缆附件通常用制成喇叭状的应力锥来控制界面电场分布,以达到优化电场的目的.传统设计方法通常用简化公式计算应力锥锥面曲线形状及应力锥轴向长度,再根据计算结果设计应力锥形状,通过经验值来确定屏蔽管和接头本体的长度<sup>[6-7]</sup>.该法无法了解接头内部的电场分布,很难防止局部场强畸变.近年来,基于有限元法对电缆附件参数进行优化以改善电缆接头内部电场分布的方法,受到了越来越多研究者的关注<sup>[8]</sup>.李华春等<sup>[9]</sup>建立了电缆附件的有限元法分析模型,并基于该模型合理设计应力锥的曲线参数以优化电场分布.王霞等<sup>[10]</sup>进一步推导了电缆附件在扩张过程中的变形和位移方程,然后利用该变形和位移方程对电场优化后呈扩张态的附件结构进行结构松弛,从而确保电缆附件安装后的最优电场分布.

上述文献仅考虑应力锥对电缆附件电场分布的影响,忽略了电缆附件系统中的其他参数,如屏蔽管长度、端口形状、中间接头本体长度等的影响.因此,本文以 10 kV 冷缩式电缆附件中间接头为研究对象,基于有限元法对电缆中间接头的内部电场进行分析;然后,通过调整应力锥曲线状态和轴向长度、屏蔽管长度和端口尺寸等参数优化电缆接头内部的电场分布,改善电缆附件产品的设计质量.

## 1 10 kV 冷缩式中间接头材料的选择

### 1.1 结构与材料

10 kV 冷缩式电缆附件中间接头的结构包括内外半导体层、应力锥、电缆主绝缘、铜导体、附件主绝缘、屏蔽管,其结构模型如图 1 所示.

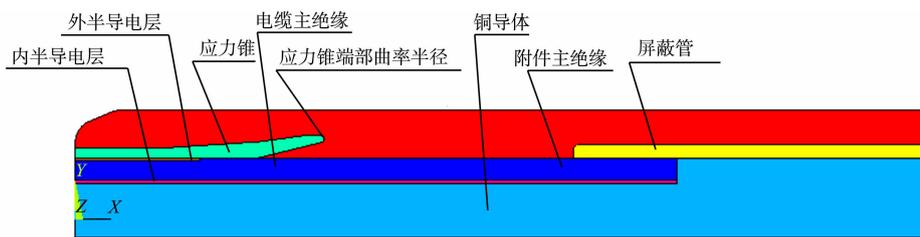


图 1 10 kV 冷缩式电缆中间接头 1/4 结构模型

Fig. 1 1/4 structure model of 10 kV cold-shrink cable intermediate connector

选取某企业生产的一款 10 kV 冷缩电缆附件中间接头进行优化,该产品的结构尺寸参数(采用经验设计方法所得),如表 1 所示.表 1 中: $l$  为长度; $d$  为厚度; $r$  为端部曲率半径.

表 1 10 kV 冷缩式电缆中间接头的结构尺寸参数

Tab. 1 Structural dimension parameters of intermediate joint of 10 kV cold-shrink cable

附件本体		屏蔽管		应力锥			连接金具	预留的主绝缘
$l_1$ /mm	$d_1$ /mm	$l_2$ /mm	$d_2$ /mm	$l_3$ /mm	$d_3$ /mm	$r$ /mm	$l_4$ /mm	$l_5$ /mm
360	11	130	2.5	55	2.5	20	100	60

### 1.2 优化参数选择

如图 1 所示,电缆接头系统采用应力锥控制接头内部界面的电场分布,从而实现均匀电场以改善接头系统中金属护套和屏蔽层边缘处场强集中现象的目的.因此,应力锥的尺寸参数,包括应力锥长度及

端部半径参数,对电缆接头内部电场分布具有很大影响,需要合理优化.不仅如此,中低压冷缩式电缆中间接头通常在附件中加入屏蔽管,并使其两端搭接在电缆主绝缘上,形成法拉第笼以克服电缆接头处的高电位影响.

屏蔽管的端口形状和长度也会对接头内部电场分布有很大的影响.屏蔽管的长度过长会导致附件本体过长,而过短则会影响屏蔽管的屏蔽作用,导致接头处的高电位集中.屏蔽管参数,包括屏蔽管端口形状和长度,需要合理优化设计.在确定应力锥和屏蔽管参数后,应力锥和屏蔽管之间的距离会直接影响到电缆附件本体的长度.应力锥和屏蔽管之间距离过小或过大,都会对附件本体的电场分布产生很大的影响,故需要合理优化电缆附件本体的长度.

### 1.3 材料的选择

目前常用的应力锥材料主要有硅橡胶(SIR)和三元乙丙橡胶(EPDM).三元乙丙橡胶硬度高、抗撕裂性好、弹性模量大、抗张强度高、工频击穿强度高,与硅油有较好的相容性.因此,它适宜于生产高压整体预制式中间接头主体,以及套管式端、GIS终端、装配式接头等带有机械压紧装置产品的应力锥.

三元乙丙橡胶能使产品对电缆的绝缘界面抱紧力更大,界面特性更好.采用三元乙丙橡胶制造应力锥,能更好地发挥其高电气击穿性能的优点,使其几何尺寸较小,电气绝缘裕度更高.硅橡胶具有较好的耐气候性、憎水性、弹性伸长率(硅橡胶 $\geq 450\%$ ;三元乙丙橡胶 $\geq 350\%$ )、耐漏电痕性能,一般用来生产中低压冷缩式户、内外终端及冷缩中间接头等产品.文中研究对象为10 kV冷缩式中间接头,因此,选择硅橡胶作为应力锥的制作材料.由于10 kV电缆中间接头的屏蔽管材料一般和应力锥相同,所以同样选择硅橡胶作为屏蔽管的制作材料.

## 2 有限元法优化电缆中间接头参数

### 2.1 模型分析及边界条件

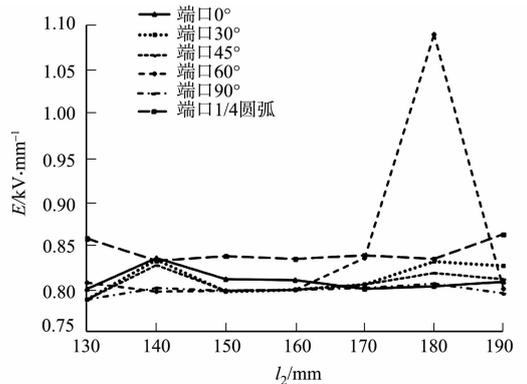
选取YJV22-8.7/15-185型单芯电缆及相匹配的GL-185铜连接管,长度为100 mm的接头连接器为研究对象.对模型维数的选择取决于接头的几何特征,若接头具有轴对称特性,则采用二维轴对称方式建模;如果缺陷引入后接头的轴对称性被破坏,则必须采用三维立体模型<sup>[11]</sup>.标准的电缆接头为轴对称实体<sup>[12-13]</sup>,因此,采用二维轴对称方式建模,依据其形状参数,基于ANSYS软件进行1:1比例的建模仿真.10 kV冷缩式电缆附件中间接头各结构材料参数:导线芯、附件主绝缘、半导体层、屏蔽管、应力锥和电缆主绝缘的相对介电常数分别为10 000,2.8,60,700,28和2.3.

为了研究电缆附件中间接头的电场分布情况,需要对其边界条件进行设定.10 kV的交联聚乙烯电缆中间接头根据国家标准GB/T 12976.1-2008《额定电压35 kV及以下铜芯、铝芯纸绝缘电力电缆 第一部分:一般规定》的要求<sup>[14]</sup>,在电缆线芯铜导体上施加电缆设计用的额定工频电压有效值( $U_0$ )为8.7 kV.同时,根据安装规范,中间接头安装时电缆铜带屏蔽处接有地线,因此,接头外表面及外半导体层与应力锥接触面施加 $U_1=0$  kV.两段电缆的缆芯之间由铜连接管相连,在仿真过程中视为相同材质直接相连的情况,忽略其断开<sup>[15-16]</sup>,在此边界条件下,研究电缆接头的电场分布情况.

### 2.2 屏蔽管结构参数配合对电场分布的影响

对电缆中间接头6种不同端口形状(端头处为1/4圆弧状,端头处圆心角分别为 $90^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ, 0^\circ$ )和7种不同长度(130,140,150,160,170,180,190 mm)屏蔽管的相互配合进行仿真计算,结果如图2所示.图2中: $l_2$ 为屏蔽管长度; $E$ 为场强.

由图2可知:在端口处为 $90^\circ$ 时,屏蔽管端口处场强、切向场强和最大场强值为最小,更能优化电场,是最好的选择.国内外很多电缆附件厂家常常用一种很简洁的处理方式,即把中间屏蔽管的两头削成一个锐角,然而那样并不能够改善场强,而仅仅是考虑经济的一种处



(a) 屏蔽管端口处场强变化规律

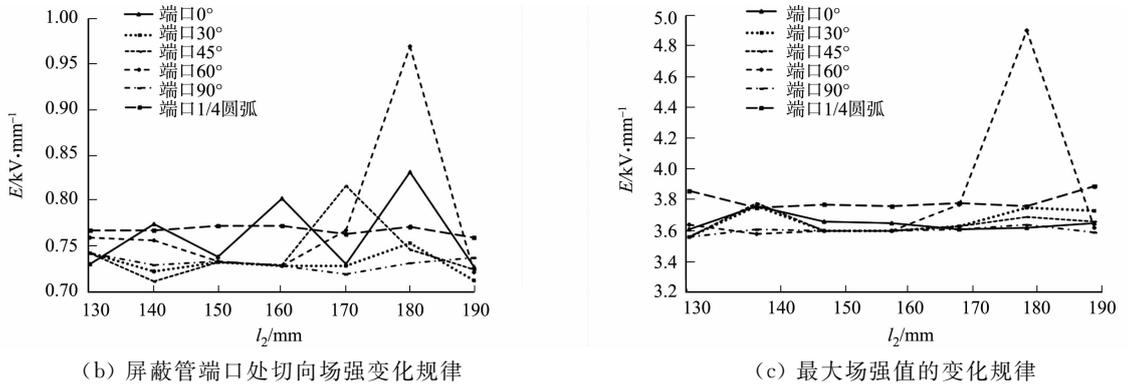


图 2 不同屏蔽管长度和端口形状配合使用时的电场变化规律

Fig. 2 Electric field variation with different shielding tube lengths and port shapes

理方式. 若要更科学地考虑电缆附件的使用寿命, 在附件设计时屏蔽管端口形状也应纳入考虑范围.

由图 2 可知: 当屏蔽管长 130 和 190 mm 时, 屏蔽管端口处场强相对较小, 但此时屏蔽管端口处的切向场强相对较大. 综合考虑, 10 kV 电缆冷缩电缆附件中屏蔽管选用端口为 90°、长度为 170 mm 时更能优化场强, 为最好的选择.

### 2.3 应力锥结构参数配合对电场分布的影响

2.3.1 应力锥厚度 通过有限元法对不同厚度的应力锥进行仿真计算, 结果如图 3 所示. 图 3 中:  $d_3$  为应力锥的厚度. 由图 3 可知: 改变应力锥的厚度对切口处场强及应力锥附近切向场强的影响不大. 根据仿真结果, 并考虑到安装尺寸的要求, 选择应力锥厚度为 2.5 mm.

2.3.2 不同长度应力锥与端部曲率半径的相互配合 未加装应力锥时电场分布情况, 如图 4 所示. 从图 4 可知: 未加装应力锥情况下, 最大场强为  $5 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ .

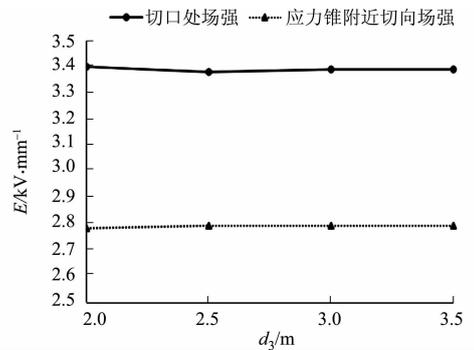


图 3 不同厚度应力锥场强变化规律  
Fig. 3 Variation of field strength with different thickness stress cones

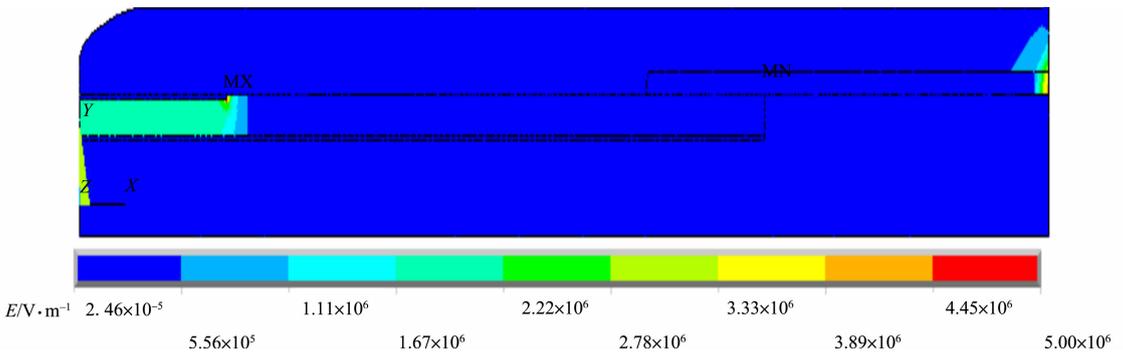
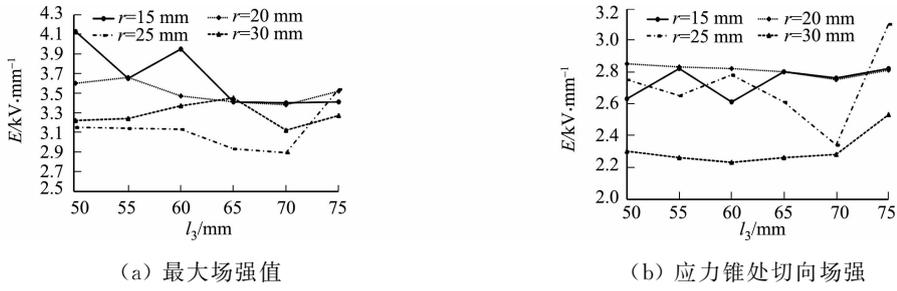


图 4 未加装应力锥时电场分布情况

Fig. 4 Electric field distribution without stress cone

对电缆中间头的不同长度与不同端部曲率半径应力锥的相互配合进行仿真计算, 结果如图 5 所示. 图 5 中:  $l_3$  为应力锥的长度. 从图 5 可知: 在加装应力锥情况后, 应力锥使电缆绝缘表面的轴向应力控制在  $3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ . 应力锥长度过小会导致最大处场强数值的增大, 而应力锥长度过大会导致应力锥处切向场强增大. 当曲率半径在 25 mm 时, 最大场强值相对较小, 而端部曲率半径为 30 mm 时, 应力锥处切向场强较小, 但是此时最大场强值却比曲率半径为 25 mm 时大. 虽然增大锥面曲率半径有利于电场均匀分布, 但过大的曲率半径会使端部离硅橡胶外绝缘的距离减小, 导致附件本体的最大场强值也随之增大, 对外绝缘的抗闪络性能产生不利影响. 应力锥长度为 60, 65, 70 mm 时, 各项性能指标相差不大, 但随着应力锥长度增大, 会使本体长度增大, 增加制造和安装难度.

从图 5 可知: 当屏蔽管端部曲率半径为 25 mm、长为 65 mm 和曲率半径为 25 mm、长为 70 mm 时,



(a) 最大场强值

(b) 应力锥处切向场强

图5 不同应力锥长度和端部曲率半径配合使用时电场变化规律

Fig. 5 Electric field variation with different stress cone lengths and port shapes

最大场强和应力锥附近切向场强均小于空气击穿场强  $3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 各项性能指标均满足要求. 综合考虑下, 10 kV 电缆冷缩电缆附件中应力锥选用曲率半径为 25 mm、长为 65 mm 时更能优化场强, 为更好的选择.

2.4 附件本体长度对电场分布的影响

应力锥与屏蔽管之间的距离直接影响到附件本体最终的长度. 10 kV 冷缩附件中间接头本体的长度等于两端应力锥的长度, 屏蔽管长度和预留的主绝缘长度(爬距)的总和. 通过有限元法对应力锥到屏蔽管之间不同长度(即爬距)进行仿真计算, 结果如图 6 所示. 图 6 中:  $s$  为应力锥到屏蔽管之间距离.

从图 6 可知: 应力锥与屏蔽管之间距离过小或过大都会对附件本体的电场分布产生很大的影响; 当距离为 30, 40 mm 时, 最大切向场强较小, 但此时最大合成场强却大于空气击穿场强  $30 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ ; 当距离为 60 或 70 mm 时, 最大合成场强和最大切向场强均小于  $3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 满足设计要求. 应力锥与屏蔽管之间距离的增大会导致冷缩中间接头本体长度的增大, 所以, 选择应力锥与屏蔽管距离为 60 mm, 其电场仿真结果如图 7 所示. 最终设计出来的 10 kV 冷缩附件中间接头本体的长度为  $2 \times 65 \text{ mm}$  (应力锥长度) +  $2 \times 60 \text{ mm}$  (应力锥与屏蔽管之间距离) +  $2 \times 85 \text{ mm}$  (屏蔽管长度) = 420 mm.

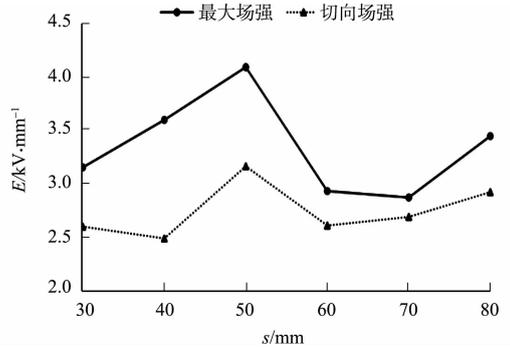
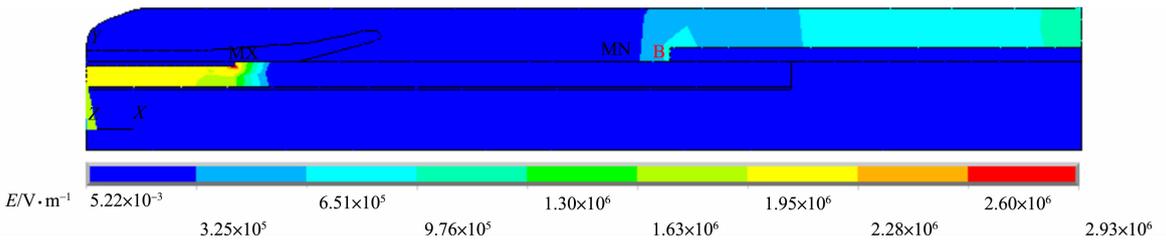
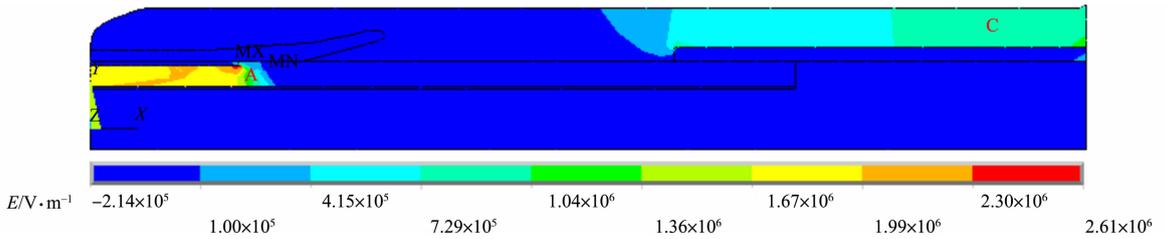


图6 应力锥与屏蔽管之间不同距离的电场强度变化规律

Fig. 6 Variation of electric field strength at different distances between stress cone and shielding tube



(a) 场强分布



(b) 切向场强分布

图7 10 kV 冷缩附件中间接头的电场分布

Fig. 7 Electric field distribution of the intermediate joint of 10 kV cold-shrink attachment

从图 7 可知: 应力锥端部的最大电场强度(对应图 7(b)中 A 点)为  $2.61 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 小于硅橡胶外

表面的最大切向电场强度控制值( $6 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ );硅橡胶与交联聚乙烯界面的最大电场场强(对应图 7(a)中 B 点)在设计控制值以内(不超过  $1 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ );硅橡胶外表面的最大切向电场强度(对应图 7(b)中 C 点)为  $0.729 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,远小于硅橡胶表面闪络电场强度.因此,优化后所得冷缩附件的电场分布更加均匀合理.

### 3 试验验证

根据前文分析,制作两组电缆附件中间接头试验样品以达到配合对比的目的.试样 1 样本为原始方案(即根据经验公式直接设计的方案),试样 2 是经有限元分析后优化的方案.局部放电是 XLPE 电缆绝缘劣化的特征和主要原因.因此,根据相关标准中对电缆附件的试验要求<sup>[17]</sup>,在实验室对两组电缆附件样品进行局放和耐压试验.

使用 50 Hz 正弦电压依次对试样进行实验,逐渐升高变压器电压直到 15 kV,测量结果以累计放电幅值的椭圆相位谱图表现.局放试验中,当测量到的局部放电量大于 10 pC 时,局部放电试验不合格.耐压试验是逐渐升高变压器电压直到 39 kV,测试时间 5 min,期间无击穿和闪络,则耐压试验合格.试验电缆型号为 YJV22-8.7/15-185 型单芯电缆及相匹配的长度为 120 mm 的接头连接器,制作的电缆中间接头和试验现场,分别如图 8,9 所示.



图 8 试验电缆的制作

Fig. 8 Manufacture of test cable



图 9 试验现场

Fig. 9 Test site

两组中间接头试样的局放和耐压试验结果,如表 2 所示.

表 2 接头现场试验结果

Tab. 2 Joint field test results

项目	测试标准	标准要求	测试结果
试样 1	工频电压试验	IEC 60502-4:2010	39 kV, 5 min, 不击穿不闪络
	室温下局部放电试验	IEC 60502-4:2010	15 kV 放电量不大于 10 pC
试样 2	工频电压试验	IEC 60502-4:2010	39 kV, 5 min, 不击穿不闪络
	室温下局部放电试验	IEC 60502-4:2010	15 kV 放电量不大于 10 pC

从表 2 可知:根据 IEC 60502-4:2010 标准,试样 1 虽然通过了工频电压测试,但室温下局部放电测试中 15 kV 时局放量为 23.6 pC,大于测试标准中的 10 pC,测试不合格;试样 2 在工频耐压测试和室温下,局部放电测试结果均满足要求,说明经有限元优化的 10 kV 电缆附件中间接头结构合理,电场分布均匀,可满足实际运行要求.

### 4 结论

应用有限元法优化冷缩式电缆中间接头附件参数,能够改善电缆附件系统中的电场分布,抑制电场畸变,优化效果非常明显.

当应力锥的轴向长度、端部曲率半径及厚度分别为 65, 25 和 2.5 mm,屏蔽管长度和端口形状的分别为 170 mm 和  $90^\circ$ ,应力锥与屏蔽管之间的距离(爬距)为 60 mm,中间接头本体长度为 420 mm 时,最大场强和最大切向场强均小于  $30 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ (空气击穿场强),满足设计要求;而且,其交界面上的电场

分布也较为均匀,可为 10 kV 冷缩中间接头的合理设计提供参考。

### 参考文献:

- [1] 《电线电缆手册》编委会组. 电线电缆手册: 第 1 册[M]. 北京:机械工业出版社,2014.
- [2] ORTON H. Power cable technology review[J]. High Voltage Technology,2015,41(4):1057-1067. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.2015.04.001.
- [3] 王劲,覃煜,张行,等. 10 kV 交流电力电缆冷缩式中间接头电场仿真[J]. 广东电力,2018(12):127-133. DOI:10.3969/j.issn.1007-290X.2018.012.018.
- [4] 王霞,余栋,段胜杰,等. 高压电缆附件设计环节中几个关键问题探讨[J]. 高电压技术,2018,44(8):2710-2716. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20180731030.
- [5] 周象贤,曹俊平,王少华,等. 110 kV 电缆中间接头典型缺陷电场三维仿真分析[J]. 绝缘材料,2018,51(7):54-58. DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2018.07.009.
- [6] EL-BAGES M S, ABD-ALLAH M A. Electric field distribution within underground power cables in presence of micro cracks[J]. International Journal of Scientific and Research Publications,2016,6(3):160-165.
- [7] 廖敏夫,黄金强,葛国伟,等. 110 kV XLPE 电缆 GIS 内锥插拔式快速中间接头的设计[J]. 高电压技术,2016,42(2):485-495. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.2016.02.020.
- [8] 余海涛,邵可然,罗俊华. 用有限元法优化高压电缆参数[J]. 高电压技术,2004,30(3):3-4,8. DOI:10.3969/j.issn.1003-6520.2004.03.002.
- [9] 李华春,章鹿华,周作春,等. 应用有限元方法优化应力锥设计[J]. 高电压技术,2005,31(11):55-57. DOI:10.3969/j.issn.1003-6520.2005.11.020.
- [10] 王霞,王陈诚,吴镔,等. 一种新型高压电缆附件优化设计方法[J]. 西安交通大学学报,2013,47(12):102-109. DOI:10.7652/xjtub201312018.
- [11] 张龙,张伟,李锐鹏,等. 10 kV XLPE 电缆终端缺陷仿真与电场分析[J]. 绝缘材料,2014,47(4):83-88. DOI:10.3969/j.issn.1009-9239.2014.04.021.
- [12] ZHENG Zhong, FENG Wei, YU Yang, *et al.* Investigation of a possible design defect in the power cable terminal through finite element analysis[C]//Proceedings of the 32nd Electrical Insulation Conference, Philadelphia: IEEE Press,2014:43-46. DOI:10.1109/EIC.2014.6869343.
- [13] ZHAO Xiaolei, YANG Xiao, GAO Lei, *et al.* Tuning the potential distribution of AC cable terminals by stress cone of nonlinear conductivity material[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(5):2686-2693. DOI:10.1109/tdei.2017.006043.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 额定电压 35 kV 及以下铜芯、铝芯纸绝缘电力电缆 第一部分: 一般规定: GB/T 12976.1-2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [15] HOU Shuai, FU Mingli, LI Chunyang, *et al.* Electric field calculation and analysis of HVDC cable joints with nonlinear materials[C]//Proceedings of the 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, Sydney: IEEE Press,2015:184-187. DOI:10.1109/ICPADM.2015.7295239.
- [16] 陈剑,刘春明,王茂海,等. 广义有限差分法在静态电磁场计算中的应用[J]. 电工技术学报,2018,33(7):1579-1587. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.170548.
- [17] IEC CENTRE OFFICE. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ( $U_m=1.2$  kV) up to 30 kV ( $U_m=36$  kV): Part 4: Test requirements on accessories for cables with rated voltages from 6 kV ( $U_m=7.2$  kV) up to 30 kV ( $U_m=36$  kV): IEC 60502-4: 2010[S]. Switzerland: IEC Centre Office, 2010.

(责任编辑:黄仲一 英文审校:吴逢铁)