

电缆中间接头缺陷仿真与局部放电实验研究

赵筱赫^{1,2}, 杨捷^{1,2,3,4}, 李士强^{2,5}, 史炳杰^{1,6}, 龙金易¹, 杨化忠¹

(1. 河南工学院 电气工程与自动化学院, 河南 新乡 453003; 2. 河南省线缆结构与材料重点实验室, 河南 新乡 453003;
3. 韩国东西大学 研究生院, 韩国 釜山 47011; 4. 河南省新能源发电关键装备工程研究中心, 河南 新乡 453003;
5. 中国科学院 电工研究所, 北京 100190; 6. 沈阳工业大学, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 由于电缆接头制作工艺的影响, 中低压电缆的中间接头故障率较高。以 10 kV XLPE 电缆为对象, 研究缺陷类型对电缆局部电场分布与局部放电特性的影响。通过构建电场分析的仿真模型, 搭建局部放电实验平台, 研究不同的电缆接头制作缺陷对电缆接头局部电场畸变的影响, 对实验试样进行局部放电实验。结果表明, 电缆接头制作过程中不同类型的缺陷及缺陷大小对电缆接头部位电场分布、电场的畸变程度、放电初始电压与放电量均有不同程度的影响。研究结果为构建电缆线路工作状态在线监测系统以及电缆运行状态评估与故障诊断提供了依据。

关键词: 电缆中间接头; 工艺缺陷; 电场分布; 局部放电

中图分类号: TB247

文献标志码: A

文章编号: 2096-7772 (2024) 02-0001-07

0 引言

中低压电缆作为城市配电网末端的“最后一公里”, 其数量十分庞大。由于电缆生产工艺的限制, 单根电缆的长度有限, 所以在缆线长距离敷设中, 需要用到大量的中间接头。由于电缆中间接头的生产、安装具有不连续性, 其电性能除了受材料性能、生产工艺影响外, 还与现场施工环境和制作技术水平密切相关, 故电缆中间接头常常会成为整条线路中绝缘最薄弱的环节^[1]。尤其是电缆中间接头一般采用现场制作方式安装, 在施工过程中, 不可避免在接头处留下刀痕、气隙、杂质颗粒等缺陷, 这些缺陷造成电缆材料性能的局部改变, 在电场作用下, 缺陷处会发生局部放电, 引起绝缘材料局部性能劣化, 进而造成绝缘击穿^[2]。因此, 研究中间接头在不同工艺缺陷下的电场分布特性及局部放电特性, 对线路工作状态评估与故障诊断具有重要意义。

预制式热缩或冷缩接头具有造价低廉, 便于施工等优点, 深受行业青睐。然而, 这类中间接头的安装顺序为由内到外逐层加工, 接头内部存在多种绝缘

材料共存的复合界面结构, 再加上应力集中及现场施工工艺难以保障等问题, 可能导致电缆接头长期运行过程中发生故障^[3,4]。据长期运行经验可知, 导体压接管与应力锥界面之间为局部放电多发部位^[4]。刘刚等对连接管与内应力锥界面之间含气隙和误缠绕绝缘带 2 种缺陷下的中间接头进行了电场仿真计算, 结果发现, 电场的畸变程度与缺陷厚度成反比关系^[5]。李如峰等采用有限元方法研究层间微气隙中的电场, 发现层间微气隙引起附近电场发生严重畸变, 且畸变程度与气隙大小成正比^[6]。陈庆国等研究了不同位置气隙缺陷对中压电缆接头中电场的影响, 结果表明, 气隙缺陷远离电缆中心轴时, 缺陷对电场的影响会略有减小^[7]。Yang H S 等研究了不同缺陷对 110 kV 电缆接头电场分布的影响, 通过有限元分析计算电缆接头的电场分布, 发现不同缺陷都会造成电场强度畸变, 但电场畸变程度与缺陷类型有关^[8]。局部放电是发生电缆故障的主要原因, 根据局部放电量的大小能够较全面、灵敏地识别缺陷类型并反映电缆的绝缘状态, 故其是电缆绝缘工作状态的“晴雨表”^[9,10]。根据《2022 年全国电力可靠性年度报告》, 2019—2022 年,

收稿日期: 2023-11-22

基金项目: 河南省科技攻关项目 (222102220102); 河南省线缆结构与材料重点实验室开放课题 (HKL-CSM2022002); 河南工学院高层次人才科研启动基金 (KQ2107)

第一作者简介: 赵筱赫 (1983—), 女, 河南叶县人, 讲师, 博士, 主要从事多物理场耦合仿真与电磁信息检测技术研究。

10 kV 电缆线路故障停电率分别为 3.34、4.06、3.98、1.43（次 / 百千米 · 年），按发生故障部位来看，电缆接头故障占总故障的 27.46%。研究电缆中间接头的工艺缺陷引起的局部放电特性，对建立电缆工作状态评估体系，判断电缆缺陷类型数据具有重要意义。

本文以 10 kV XLPE 电缆为研究对象，制作含不同单一工艺缺陷的电缆中间接头，根据实际接头结构，建立有限元计算模型，分析在正常和不同缺陷下的电场分布，重点分析缺陷附近的电场分布，最后对试验样品逐个进行局部放电实验，通过监测接地线上的高频局放信号，并采用 JF-2000 局放仪监控放电量，同时由示波器采集放电信号时域波形，通过分析信号特征，建立信号特征与缺陷类型之间的对应关系，从而为电缆中间接头缺陷类型的判定提供参考。

1 实验样品制作

本研究选用出厂局部放电实验合格的全新电缆样品，样品型号为 YJLV 10/35 3*400 mm²，分相屏蔽型电缆结构，各相缆线的电场分布互不影响，可将每相缆线做为单芯电缆分析。每个样品长度 10 m，在中部锯断，加装中间接头，接头处基本结构如图 1 所示。导体压接管材质与线芯相同，通过液压钳将其压紧后打磨表面毛刺，并对压接管口做圆角处理，用专用清洁工具擦拭表面杂质后，包缠聚丙烯半导电带，之后采用热缩方式，依次安装应力管和接头主绝缘，主绝缘热缩完毕后，在其两端缠绕密封胶条，最后采用铜丝网套将两侧导体屏蔽可靠连接，完成单根缆线的接头安装。

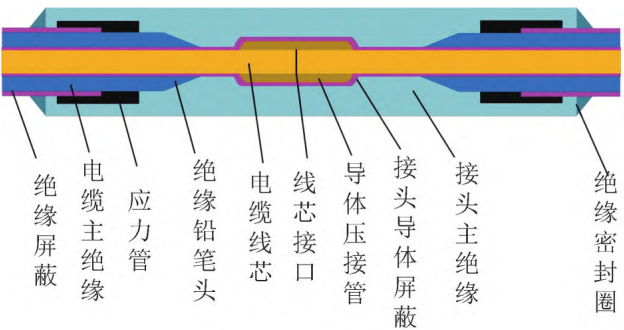


图 1 电缆中间接头结构示意图

对电缆接头故障原因的统计结果表明，导体压接质量及表面处理质量、绝缘刀痕、绝缘杂质及绝缘层气泡等问题是造成电缆中间接头局部放电甚至击穿的主要原因。为研究不同缺陷类型下的电场分布与局部放电特性，在制作每个接头时，设置单一类型的工艺缺陷，共设置四种典型工艺缺陷，如图 2 所示。导体

压接管一般采用六边钳口环压以保证其压接质量，在压接后，会在表面留下金属尖刺和棱边，如图 2（a）为所示，若不加打磨或打磨不到位，将引起压接管表面电场异常集中。电缆主绝缘剥切后，在接头制作过程中，部分电缆绝缘暴露，若防护不当，会使绝缘外表面粘附导体碎屑或土壤颗粒，其中导体碎屑较土壤颗粒对局部电场的影响更为明显，图 2（b）为绝缘表面导体杂质缺陷，导体杂质尺寸为 1 mm × 1 mm × 1 mm。在电缆外半导电层剥除时，若下刀力度过大，则可能在绝缘外侧留有刀痕，如图 2（c）所示，刀痕宽度 0.5 mm，深度 2 mm。由于热缩工艺限制，单层热缩绝缘厚度较小，接头主绝缘采用多层叠加热缩形式制作，若外层绝缘热缩不到位，将在两层主绝缘之间形成气隙（如图 2（d）），空气隙长 20 cm，宽 2 cm。



图 2 含工艺缺陷的电缆接头样品

2 电场的有限元计算原理

电缆工作频率为 50 Hz, 其绝缘部分在低频电场作用下, 可忽略位移电场及交变磁场对极化性能的影响。工艺缺陷不仅引起绝缘材料结构与性能变化进而导致局部电场的畸变, 同时, 由于电缆接头处绝缘材料不连续, 在材料承接位置引入了局部微小气隙, 这些微小气隙在电场作用下具有首先发生局部放电的可能性, 因此, 关注电缆中间接头工艺缺陷对静电场分布的影响具有重要意义。

静电场为有源无旋场, 根据静电场基本方程

$$\begin{aligned} \nabla \bullet D &= \rho_v \\ \nabla \times E &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

根据无旋场的性质, 可以将静电场的电场强度表示为标量函数梯度的形式

$$E = -\nabla V \tag{2}$$

将 (2) 式带入 (1) 式, 得到电位函数 V 所满足的泊松方程

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon} \tag{3}$$

当区域内场源、材料空间分布及边界条件明确后, 上式即有唯一解。

3 COMSOL Multiphysics 建模与分析

3.1 仿真模型

按照所研究型号电缆中间接头实际尺寸, 在 COMSOL Multiphysics 中创建静电场分析模型 (如图 3 所示), 并赋予材料属性。各结构材料属性如表 1 所示。

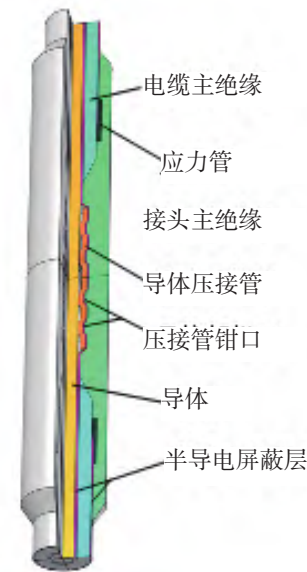


图 3 电缆中间接头仿真模型

表 1 10 kV 电缆中间接头结构信息

结构	材料名称	介电常数	电导率/(S/m)	击穿强度/(kV/mm)
导体	铝	-	3.538e7	-
导体压接管	铝	-	3.538e7	-
导体屏蔽	导电聚乙烯	50	0.1	30
绝缘屏蔽	导电聚乙烯	50	0.1	30
电缆主绝缘	交联聚乙烯	2.2	<1e ⁻¹⁰	35
接头热缩主绝缘	交联聚烯烃	2.5	<1e ⁻⁹	22
半导体带	乙丙橡胶包绕带	3	0.1	30
应力管	热缩应力管	22	<0.001	22
气隙	空气	1	-	3

采用 3D 静电场计算模块, 针对图 2 所示的每一种缺陷模型, 在相应位置构建局部缺陷模型, 采用自适应网格剖分方法, 提取局部电场参数, 研究缺陷引起的电场畸变特性。为便于数据分析对比, 计算中缺陷设置在接头一侧, 另一侧为无缺陷, 同时提取缺陷部位及对称无缺陷部位的电场分布信息进行对比分析。

为定量评估电场畸变程度, 定义电场畸变率

$$\eta = \frac{E_{df(max)} - E_{pf}}{E_{pf}} \times 100\% \tag{4}$$

式中: $E_{df(max)}$ 为缺陷处的电场强度模, E_{pf} 为无缺陷的电场强度模。

若杂质的击穿场强与绝缘材料不同, 则畸变电场在不同材料中引发局部放电的风险不同。定义局部放电风险系数

$$\gamma = \eta \frac{E_{ci}}{E_{cf}} \tag{5}$$

式中: E_{ci} 为电缆绝缘材料的击穿场强, E_{cf} 为杂质的击穿场强。根据电缆材料的电磁性能, 当杂质的击穿场强与电缆绝缘材料不同时, 局部放电风险系数将是电场畸变率的 E_{ci}/E_{cf} 倍。对于气隙缺陷, 由于空气的击穿场强远小于绝缘材料, 局部放电风险系数将急剧增加, 在气隙中将首先发生局部放电。

3.2 电场计算与结果分析

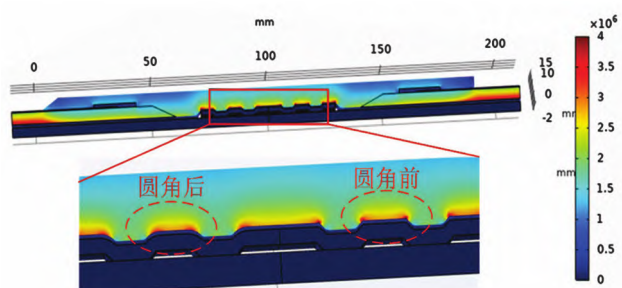
本文对图 2 所示的几种缺陷类型逐一建模分析, 对比正常电场分布, 研究缺陷对静电场分布的畸变作用, 并对比不同缺陷程度下的电场变化规律。

3.2.1 压接管表面棱角与尖刺

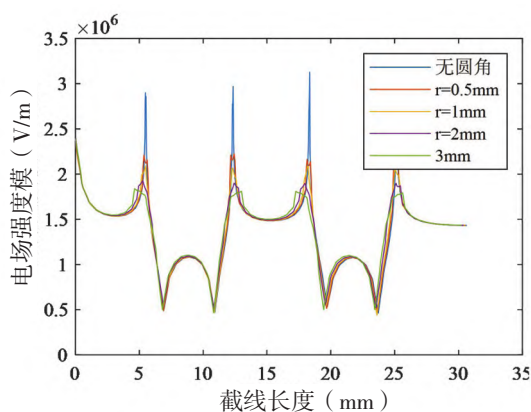
导体作为电能传输的主体, 其连接质量直接关系着电缆接头的关键性能。中低压电缆接头制作时, 通常采用与导体线芯相同材质的金属压接管, 使用液压钳将其与导体压紧, 实现导体的可靠连接。在压接管压接后, 钳口容易出现金属尖刺和棱角, 故要对钳

口部位进行打磨,使之成为曲率合适的圆弧形,并清除导体表面金属尖刺后,再进行后续工艺步骤。根据静电场基本特性,压接管表面形态与局部曲率决定了局部电场的分布。

以仿真模型中的导体接口为界,分别将其两侧的压接管钳口部位设置为棱角和圆角,计算其电场强度分布。如图4(a)所示,压接管钳口棱角处电场比较集中,圆角处的压接管钳口电场强度较小。提取导体压接管表面的纵向沿线的电场强度,分别研究不同圆角半径对电场分布的影响,如图4(b)所示,钳口处的局部电场强度随圆角半径增大而逐渐减小。提取同一钳口处的电场强度,研究其在不同圆角半径下的电场畸变率,如图4(c)所示,当圆角半径较小时,钳口电场畸变率随圆角半径增大快速减小,电场畸变率随圆角半径增加减小速度放缓,最后基本稳定在极限值20%左右。因此,考虑工艺技术要求后,在施工中,需要将压接管钳口棱角打磨成圆角,使其局部曲率半径不小于1mm。



(a)



(b)

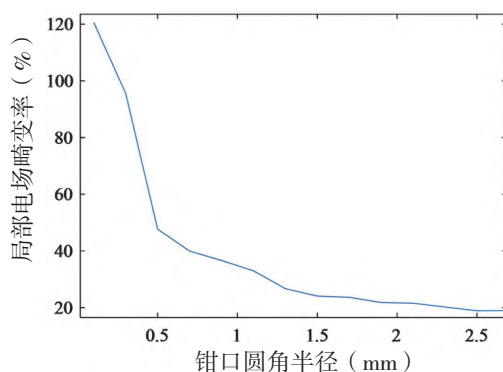
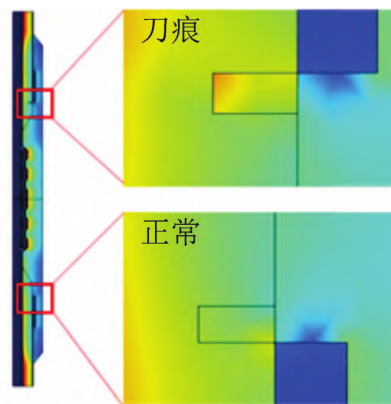


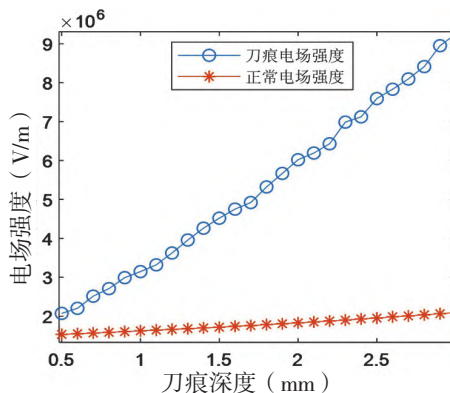
图4 压接管钳口尖角的电场畸变

3.2.2 电缆绝缘表面环剥刀痕

在外半导体层剥除时,由于下刀力度不好把握,常常在外半导体层切口附近留下绝缘环剥刀痕,应力管安装后,在刀痕处留下微小空气隙。如图5所示,对比正常剥切与刀痕位置处的电场发现,刀痕处的电场强度明显大于正常位置,且最大电场强度位置在刀痕底部。提取刀痕底部的电场强度,以研究刀痕深度对电场的影响,如图5(b)所示,刀痕底部电场强度随着刀痕深度增加近似线性增大。根据公式(4)计算局部电场畸变率,如图5(c)所示,刀痕越深,电场畸变越严重。同时,由于空气的击穿场强远低于电缆绝缘材料,极大增加了缺陷处局部放电的可能性。



(a)



(b)

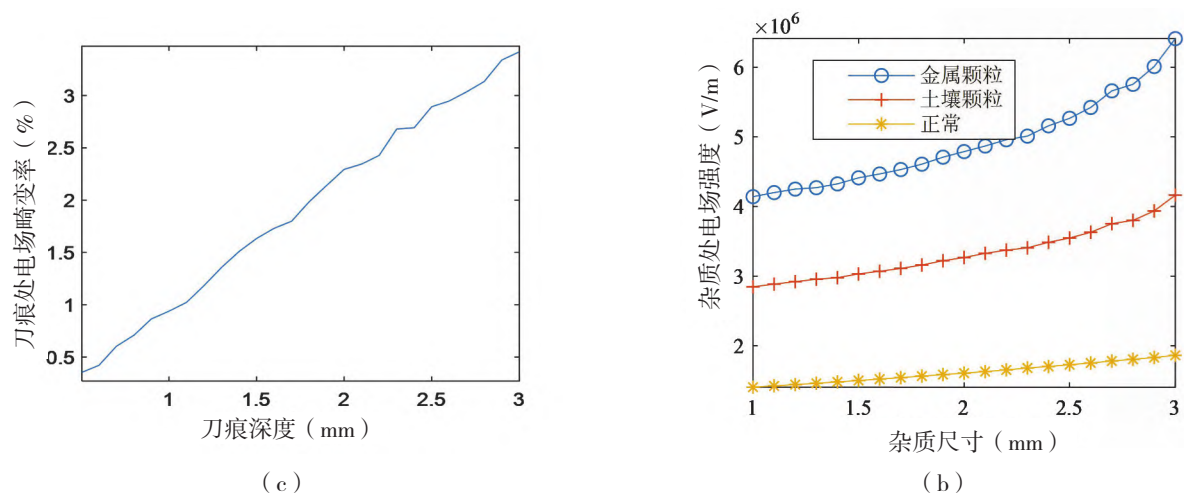


图5 绝缘表面刀痕对电场的影响

3.2.3 绝缘表面杂质颗粒

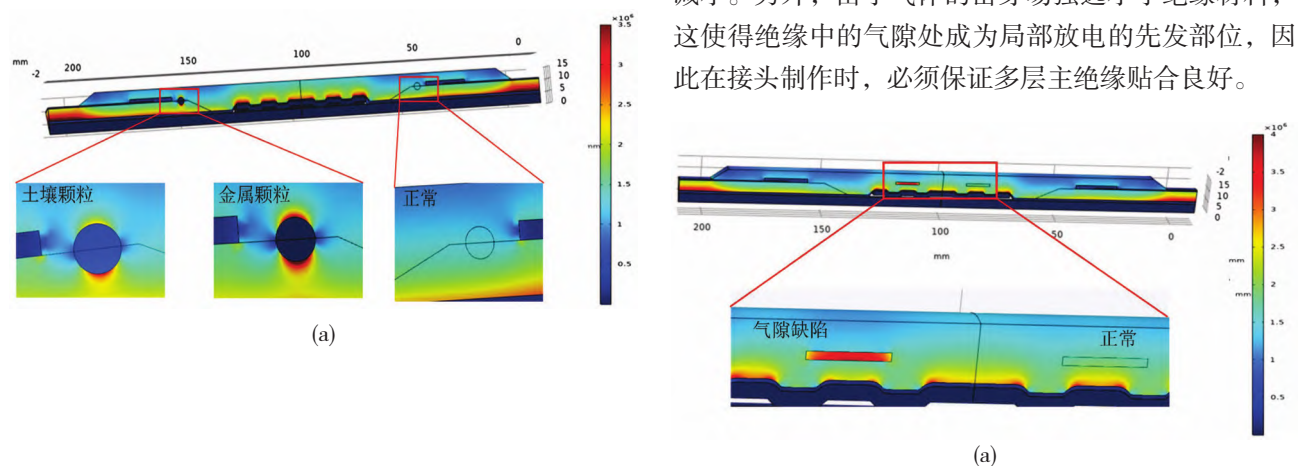
制作接头时, 需要将电缆绝缘剥除一定长度。若对绝缘表面保护不到位, 能粘附颗粒杂质, 接头绝缘热缩后, 颗粒杂质就嵌在电缆绝缘层与接头绝缘之间。由于中低压电缆接头一般现场制作, 故杂质成分较为复杂, 主要包括绝缘材料颗粒、金属颗粒、土壤颗粒等。仿真中, 在电缆绝缘与接头绝缘之间, 设置球形杂质颗粒, 如图 6 (a) 所示, 分别计算杂质为金属颗粒、土壤颗粒时电场的空间分布, 并研究杂质的尺寸对其附近材料中电场分布的影响。

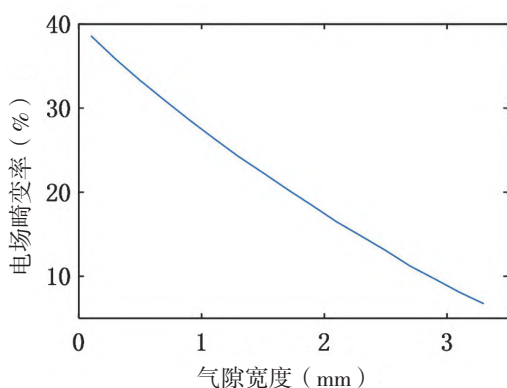
仿真结果表明, 杂质表面附近电场会分布发生畸变, 其中金属杂质对电场强度的影响比土壤颗粒更严重, 电场强度最大值点位于球形杂质颗粒外表面靠近电缆轴心的位置, 如图 6 (a) 所示。提取该处电场强度, 研究杂质尺寸对电场的影响, 如图 6 (b) 所示。随着杂质尺寸增加, 其附近电场强度幅值近似正比例增加, 且不同杂质附近的电场强度不同, 通过电场畸变率分析发现, 金属颗粒造成的电场畸变更严重(如图 6 (c))。

图6 杂质颗粒对电场的影响

3.2.4 接头主绝缘层间气隙

在电缆接头热缩套安装时, 由于单层热缩套厚度较小, 电缆中间接头主绝缘一般由多层热缩套由内向外逐层热缩而成。若接头制作时外层热缩套绝缘热缩不到位, 将在相邻层间留有空气间隙, 如图 2 (d) 所示。仿真中, 在接头绝缘中构建轴对称的气隙, 由图 7 (a) 可知, 气隙中的电场强度明显大于正常位置的电场强度; 如图 7 (b) 所示, 电场畸变率随气隙宽度增加而减小。另外, 由于气体的击穿场强远小于绝缘材料, 这使得绝缘中的气隙处成为局部放电的先发部位, 因此在接头制作时, 必须保证多层主绝缘贴合良好。





(b)

图7 接头主绝缘层间气隙对电场的影响

4 实验研究

为了研究中间接头工艺缺陷对电缆运行性能的影响,搭建了如图8所示的实验回路,进行电缆的局部放电检测实验。试验系统采用串联谐振方法获得可调的实验电压。将待测电缆两端的绝缘与绝缘屏蔽层剥除,使导体与绝缘裸露长度分别为5 cm与20 cm,对端部打磨后,将两端分别置入终端油杯中,导体与高压引线连接,绝缘浸泡在绝缘油中。由于被测线路较短,电容不足,将可调电容器与被试电缆的主绝缘并联。采用JF-2000型局部放电仪对电缆的局放性能进行测试,并同时用示波器监控放电信号波形。

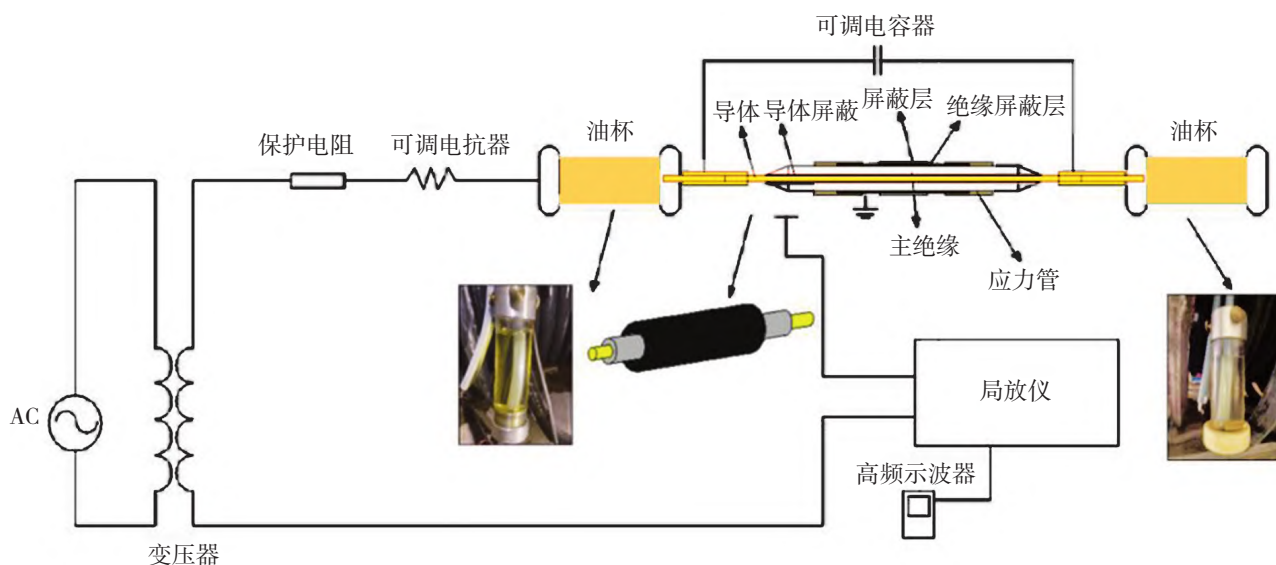


图8 局部放电实验系统示意图

实验中缓慢升高电压,当示波器监控到局部放电脉冲出现时,即停止加压,此时的电压值即局部放电起始电压值,记录该电压与放电量,结果如表2所示。

表2 局部放电实验结果

编号	样品描述	初始放电电压/kV	初始放电量/pC
1	完好模型	>12	-
2	导体压接管毛刺	7.3	28
3	绝缘环剥刀痕	3.2	6
4	绝缘层金属颗粒	4.2	37
5	外层绝缘热缩不到位	9.7	15

由实验结果可知,绝缘环剥刀痕局部放电起始电压最低,放电量最小。外层绝缘热缩不到位留下空气间隙时,放电起始电压最高,且放电规模与气隙尺

寸有关,气隙越大,放电量越大。绝缘层粘附金属颗粒时,局部放电量最大,而其起始放电电压值较小。导体压接管毛刺,在较高电压下发生局部放电,且放电量较大。

5 总结

由以上仿真结果可知,电缆中间接头中存在的工艺缺陷均会引起局部电场的畸变,局部电场强度异常增加,导致缺陷处成为绝缘最薄弱的区域,在一定程度上增加了局部放电的风险。另外,当缺陷处有气隙时,由于空气的击穿场强远小于电缆绝缘材料,更容易在气隙处首先发生局部放电。通过局部放电信息的特征提取,为构建电缆运行状态评估与故障诊断提供了依据,同时,通过局部放电信息,能够准确判

断电缆缺陷类型, 为线路维护方案的确定提供参考。

参考文献:

- [1] 刘刚, 吴亮, 金尚儿, 等. 基于电特性的 110 kV 交联聚乙烯电缆剩余寿命评估 [J]. 高电压技术, 2017, 43(8):2718–2723.
- [2] 段乃欣, 赵中原, 邱毓昌, 等. XLPE 电缆中局部放电脉冲传播特性的实验研究 [J]. 高压电器, 2002, 38(4):61–63.
- [3] 顾金, 王俏华, 尹毅, 等. 高压直流 XLPE 电力电缆预制式接头的设计 [J]. 高电压技术, 2009, 35(12):3159–3163.
- [4] 吴明祥, 欧阳本红, 李文杰. 交联电缆常见故障及原因分析 [J]. 中国电力, 2013, 46(5): 66–70.
- [5] 刘刚, 阮班义, 陈志娟, 等. 10kV XLPE 电缆接头连接管含空气隙缺陷的电场分析 [J]. 绝缘材料, 2011, 44(5):62–66, 73.
- [6] 李如锋, 梁奕, 张军建, 等. 微间隙形状对电缆中间接头场强分布影响性研究 [J]. 电力与能源, 2016, 37(5):564–567.
- [7] 陈庆国, 秦艳军, 尚南强, 等. 温度对高压直流电缆中间接头内电场分布的影响分析 [J]. 高电压技术, 2014, 40(9):2619–2626.
- [8] YANG H S, LIU L, SUN K, et al. Impacts of different defects on electrical field distribution in cable joint[J]. The Journal of Engineering, 2019, 16(3):3184–3187.
- [9] 夏睿, 谭笑, 陈杰, 等. 10kV XLPE 电缆接头典型绝缘缺陷的局部放电特征分析 [J]. 绝缘材料, 2020, 53(8):95–101.
- [10] 康强, 顾霄, 徐阳, 等. 直流局部放电检测技术综述 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(10): 69–77.

Simulation and Partial Discharge Experimental Study on Cable Intermediate Joints with Defects

ZHAO Xiaohe^{1,2}, YANG Jie^{1,2,3,4}, LI Shiqiang^{2,5}, SHI Bingjie^{1,6}, LONG Jinyi¹,
YANG Huazhong¹

(1. Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China; 2. Henan Key Laboratory of Cable Structure and Materials, Xinxiang 453003, China; 3. Graduate School, Dongseo University, Busan 47011, South Korea; 4. Henan Province New Energy Power Generation Key Equipment Engineering Research Center, Xinxiang 453003, China; 5. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 6. Shenyang University of Technology, Shenyang 110000, China)

Abstract: Due to the processing technology, the intermediate joint of medium and low voltage cables is the weak insulation area of the entire line. This article takes 10kV XLPE cables as the example to study the influence of defect types on the local electric field distribution and partial discharge characteristics of cables. Firstly, a series of simulation models were constructed for electric field analysis to study the impact of different process defects on local electric field distortion in cables. Secondly, a partial discharge experimental platform was established and partial discharge experiments on the produced test samples was carried out. The results indicated that process defects can cause distortion in the spatial distribution of the electric field, and the degree of electric field distortion is not only related to the type of defect, but also to the size of the defect. At the same time, the experimental results indicate that the initial voltage and discharge amount of partial discharge are related to the type of defect. The research results of the paper provide a basis for the construction of an online monitoring system for the working status of cable lines, as well as for the evaluation and fault diagnosis of cable operation status.

Key words: cable intermediate joint; process defect; electric field distribution; partial discharge

(责任编辑 王磊)