

## 城区典型配电电缆故障案例分析

丁楠<sup>1</sup> 吕爽<sup>2</sup>

1.中共国网天津市电力公司委员会党校（国网天津市电力公司培训中心），天津 300181

2.国网天津市电力公司城西供电公司，天津 300181

[摘要]文中通过对城区典型配电电缆热缩中间接头、冷缩中间接头及终端头三类故障案例的分析，系统研究了配电电缆在运行过程中常见的故障特征及成因。研究采用故障性质诊断、脉冲测距与声磁同步法等手段对故障点进行定位，并通过现场解剖对接头内部结构进行分析。结果表明，电缆接头故障主要由安装工艺质量不良引起，包括密封不严导致进水受潮、铜屏蔽及外半导电层断口处理不当、应力控制措施不到位、主绝缘划伤及尺寸偏差等。这些问题导致电场畸变、局部放电和绝缘老化，从而引发电缆击穿。研究指出，加强施工工艺管理、完善应力控制措施和密封防护、强化人员培训与现场质量监督，是提升配电电缆运行可靠性的重要途径。文中的分析结果对配电电缆接头设计、施工和运维管理具有重要的工程参考价值。

[关键词]配电电缆；接头故障；绝缘击穿；施工工艺

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18058 中图分类号: TM247

文献标识码: A

## Analysis of Typical Distribution Cable Fault Cases in Urban Areas

DING Nan<sup>1</sup>, LYU Shuang<sup>2</sup>

1. CPC State Grid Tianjin Electric Power Company Committee Party School (State Grid Tianjin Electric Power Company Training Center), Tianjin, 300181, China

2. Chengxi Power Supply Branch of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin, 300181, China

**Abstract:** This article systematically studies the common fault characteristics and causes of distribution cables during operation by analyzing three types of fault cases: heat shrinkable intermediate joints, cold shrinkable intermediate joints, and terminal heads in typical urban distribution cables. The study uses methods such as fault nature diagnosis, pulse ranging, and acoustic magnetic synchronization to locate the fault point, and analyzes the internal structure of the joint through on-site dissection. The results indicate that cable joint failures are mainly caused by poor installation process quality, including inadequate sealing leading to water and moisture ingress, improper treatment of copper shielding and outer semiconducting layer fractures, inadequate stress control measures, scratches on the main insulation, and dimensional deviations. These issues result in electric field distortion, partial discharge, and insulation aging, leading to cable breakdown. Research has pointed out that strengthening construction process management, improving stress control measures and sealing protection, enhancing personnel training and on-site quality supervision are important ways to improve the reliability of distribution cable operation. The analysis results in the article have important engineering reference value for the design, construction, and operation management of distribution cable joints.

**Keywords:** distribution cables; joint malfunction; insulation breakdown; construction technology

### 1 绪论

随着城市电网建设的不断推进，配电线路逐渐由架空线路向电缆化方向发展。电缆化供电不仅能提高供电可靠性和美观度，还可有效减少外界环境及气候因素对供电系统的影响。然而，电缆线路运行时间越长，电缆附件（尤其是中间接头与终端头）故障比例逐年上升，成为制约配电网稳定运行的关键环节。据统计，电缆附件类故障约占配电电缆运行故障的 70% 以上。因此，对典型配电电缆故障进行系统分析，查明原因并提出防范措施，对于提升配电网运行安全性与可靠性具有重要意义。近年来，电缆材料、工艺及检测技术快速发展，但城市复杂的环境条件和不规范的施工操作仍使部分电缆在运行中出现绝缘击

穿、放电或进水等问题<sup>[1]</sup>。本文选取城区典型故障案例，结合现场检测与结构解剖分析，从工艺、材料及电场分布等方面系统研究电缆接头故障的形成机理，并提出针对性改进建议。

### 2 电缆热缩中间接头故障案例

#### (1) 故障概况

某年 6 月 9 日 9 时 16 分，35kV 变电站某 10kV 线路零序保护动作，重合不良。经抢修班现场查线，确定为北西 2200006 杆刀闸至 KB360 开闭站 3#开关电缆故障，无外力迹象。现场拉开北西 2200006 杆刀闸和 KB360 开闭站 3#开关，将故障段隔离，其余非故障部分经倒路恢复送电。通过查阅电缆资产，该段电缆型号为

YJV22-8.7/15-3×240mm<sup>2</sup>, 长度为 1534m。

### (2) 现场故障探测

①故障性质诊断。试验人员用 2500V 兆欧表对三相电缆分别进行绝缘电阻测试, 其中 A 相为 $\infty$ , B 相到 0, C 相为 $\infty$ ; 万用表测 B 相电阻 1.81M $\Omega$ , 后用万用表进行导通性测试, 将对端三相短接, 用万用表测量测试端 AB、BC、AC 之间的电阻均为 0, 导通良好, 判断故障类型为高阻接地故障。

②故障测距。采用二次脉冲法, 对 B 相故障相测试, 由于故障点电阻较高, 对故障点多次进行升压测试, 最终波形如图 1 所示。从图中可以较明显看出波形分叉点, 即为故障距离 1233m。

③故障定点。经过查阅电缆路径资料, 初步判断故障点为中间接头。使用声磁同步法对故障点进行定点, 在 1230m 附近声磁时间差最小且耳机里监听到的放电声音强度最大, 经开挖确定为故障中间接头。

### (3) 故障原因分析

为了确定故障原因, 将故障中间接头进行解剖分析。将故障接头切下, 发现击穿位置在电缆底部, 热缩外护套管已被击穿出孔洞, 孔洞附近有水流出。剥开外护套管, 发现外护套管内侧存在大量的水渍如图 2 所示。

将内护套管打开后, 发现铜屏蔽网未用恒力弹簧固定在铜屏蔽上, 采用铜绑线固定, 容易导致接地不实, 使得接触电阻过大。如图 3 所示。

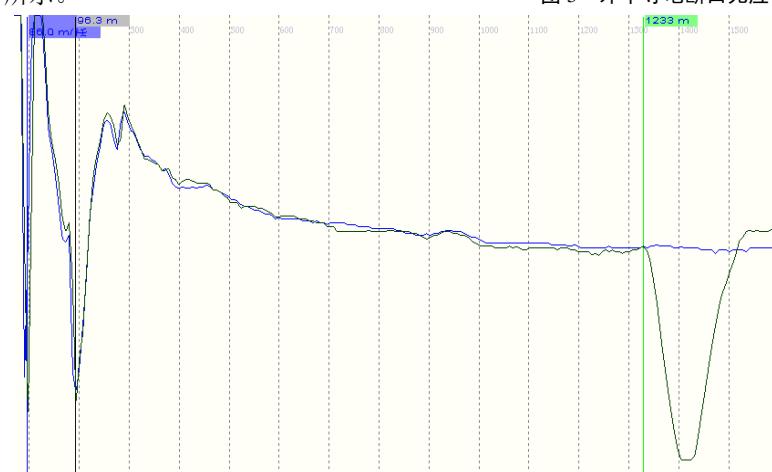


图 1 测试波形图



图 2 外护套管内部进水



图 3 铜屏蔽网用绑线固定

同时, 铜屏蔽断口处不齐, 存在较多毛刺和尖端, 长时间运行容易造成电场集中, 形成局部放电点。如图 4 所示。



图 4 铜屏蔽断口不齐存在毛刺

剥除热缩半导电管和红色绝缘管后, 在外半导电断口与绝缘处的台阶未用应力疏散胶填平, 且未安装应力管。如图 5 所示。



图 5 外半导电断口无应力疏散胶和应力管

此外，外半导电层的断口处剥切参差不齐，断口处未做倒角处理，主绝缘未打磨且存在纵向划痕。如图 6 所示。

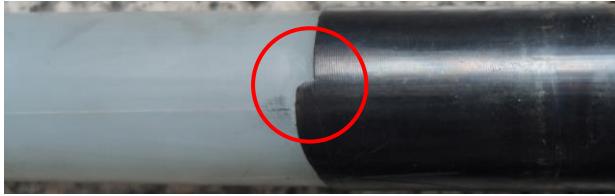


图 6 外半导电断口不齐且绝缘存在划痕

在主绝缘断口处发现了放电痕迹，存在少量水渍，主绝缘断口未倒  $45^{\circ}$  角或削成锥体，即制成反应力锥（铅笔头），造成断口处电场集中引起放电；未保留 5mm 内半导电层，因此连接管上绕包的半导电带无法搭接内半导电层。经与故障相对比，判断放电位置约在主绝缘断口处。如图 7 所示。



a) 主绝缘断口放电痕迹



b) 三相线芯对比图

图 7 故障点情况

根据现场解剖情况，判断该次故障为电缆中间接头密封不良，导致水分侵入，在电场作用下，绝缘表面形成水树枝，进而发展成电树枝。主绝缘断口处电场集中产生局

部放电，电缆进水受潮长期运行后，在主绝缘断口处沿水渍爬弧放电<sup>[2]</sup>。

### 3 电缆冷缩中间接头故障案例

#### (1) 故障概况

某年 12 月 25 日 6 时 39 分，某 220kV 变电站 35kV 某开关过流 I 段保护掉闸，某开关站 2#开关掉闸。该故障线路为双缆线路，电缆全长 3281m，投运时间为某年 9 月 12 日。

#### (2) 现场故障探测

##### ① 故障性质诊断

对三相进行绝缘电阻测试，用 2500V 兆欧表测试 A 相为 0，B 相  $\infty$ ，C 相  $\infty$ ；万用表测 A 相电阻为  $12M\Omega$ ，后用万用表做导通性测试，结果为：AB 断、AC 断、BC 通，判断为 A 相断线，结合 A 相故障电阻  $12M\Omega$ ，综合确定故障类型为 A 相高阻断线故障。

##### ② 故障测距

由于判定故障类型为断线故障，因此采用低压脉冲法进行测距，对 A 相故障相测试（图 3-1 中黑色波形），初步判断故障点为终端附近，但终端前电缆有接地反射信号，为此采用比较法对故障点进行了验证<sup>[3]</sup>。对 B 相良好相测试（图 8 中蓝色波形），通过对比可发现疑似接地反射信号并不为故障点，故障点确定为两个波形的明显分界处，从而确定故障点距离，断线故障为 2698m。

##### ③ 故障定点

经过查阅电缆路径图，使用声磁同步法，对故障点进行定点。由于测试环境恶劣，汽车来往噪音大给定点带来一定的困难，曾一度怀疑故障点是否发出了放电声。后来到对端电缆裸露的地方（远离高压信号发生器），把探头放在电缆上，通过耳机听到了明显的放电声音，确认故障点肯定已放电，又回到 2700 多米处，移动探头仔细定点，找到了声磁时间差最小的点，同时用耳机监听放电的声音强度，证明故障点就在此处，经开挖位于直埋绿化带内为冷缩中间接头。

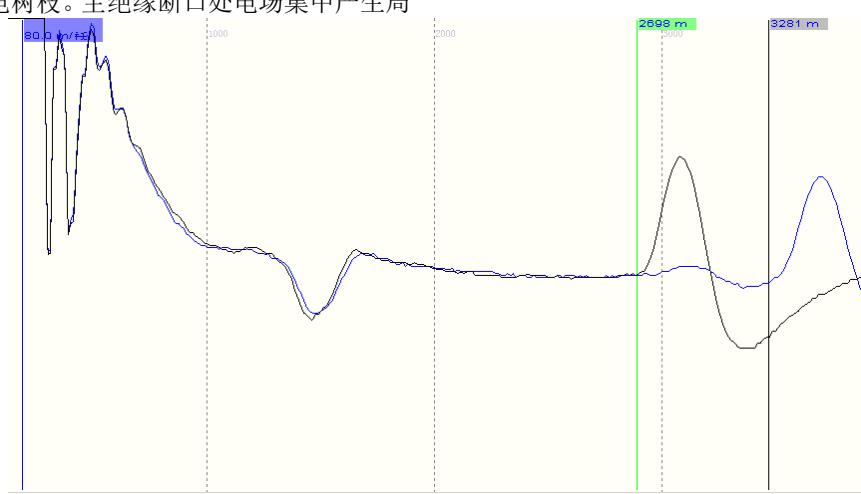


图 8 测试波形图

### (3) 故障原因分析

为了分析故障原因, 将故障接头解体, 如图 9 所示, 打开接头玻璃钢外壳, 防水胶整体固化较好, 击穿点处防水胶发生爆裂。



图 9 接头防水胶固化情况

剥除外层防水胶, 露出内层密封管, 如图 10 所示在两侧端部发现防水胶与密封管界面之间存在水分。



图 10 防水胶与密封管界面间存在水分

检查接头本体两端密封情况, 如图 11 所示, 扒开端部阻水带后发现下方存在水分。虽然外层防水胶整体固化较好, 但在防水胶与密封管界面、接头端部阻水带下方发现水分, 说明在玻璃钢外壳最外侧两端以及每层防水措施的结合面存在缝隙, 是水分入侵的薄弱点, 在接头浸水运行环境下, 水分从外壳两端沿界面缝隙向接头内部逐渐渗透, 以至于在接头本体端部密封阻水带下方发现水分。



图 11 接头端部阻水带下方存在水分

剥开密封管后可见故障接头本体, 发生故障相击穿点如图 12 所示。



图 12 故障两相击穿点

剖开接头本体, 发现故障相压接管处导体线芯已熔断, 如图 13 所示。



图 13 压接管端部导体已熔断

检查时发现, 如图 14 所示击穿点处半导电拉第笼端部与硅橡胶结合界面处出现脱离迹象, 在其他未击穿处也发现同样脱离迹象。接头内部法拉第笼与硅橡胶结合面出现分离现象, 其中位于击穿点附近的可能由于故障瞬间高温造成, 已无法确认。位于未击穿部位的也发现类似现象, 由于距离击穿点较远, 且硅橡胶不具备金属材料的导热性能, 排除故障瞬间由于高温造成两种材料分离的可能, 怀疑在制造时两种材料的结合工艺控制不到位。



a)击穿点处



b)未击穿处

图 14 法拉第笼与硅橡胶界面出现分离

检查非故障相电缆本体及接头内侧, 未发现明显放电痕迹, 但发现其中一侧的半导电断口处理不齐, 同时未做平滑处理, 用手触摸有明显台阶, 如图 15 所示, 属于安装工艺不良。



图 15 半导电断口处理不当

上述半导电法拉第笼端部与硅橡胶结合界面处出现脱离以及半导电断口存在台阶，这两点属于接头内电场强度控制范畴，存在气隙缺陷将引发局部放电，但通过对问题部位进行检查后并未发现明显放电迹象，判断不是导致故障的主要原因。此外结合投运 3 个月即发生故障，基本可排除局放瞬间发展导致击穿的可能性。因此，基于解剖中发现的进水现象，判断接头的阻水密封工艺不佳，水分沿界面缝隙渗透到接头本体内，导致电缆本体与接头硅橡胶界面间的泄漏电流增大，加速该部位发热老化，逐渐发展导致绝缘击穿，属于进水导致的热老化击穿。

#### 4 电缆终端头故障案例

##### (1) 故障概况

某年 7 月 4 日，35kV 变电站某 10kV 线路零序保护动作，重合不良。经巡视，发现甲 1300001 杆电缆冷缩终端故障，现场将两侧刀闸拉开后倒路送电。故障前，为雷雨天气。经查询电缆资产，该接头为某年架空入地工程时所制作，运行仅 5 年便发生故障。

##### (2) 故障原因分析

现场故障点位于电缆中相，由图 16 可以看出从电缆冷缩终端应力锥位置到三叉手套根部沿接地铜编织带对地形成了放电通道，电缆中相绝缘及冷缩护套管均已烧化。

将故障电缆终端头摘下，发现电缆三相安装时应力锥位置均被严重弯折，应力锥与半导电断口搭接部分容易产生气隙，导致局部放电。其中中相放电位置正处于弯折严重的应力锥上。如图 17 所示。

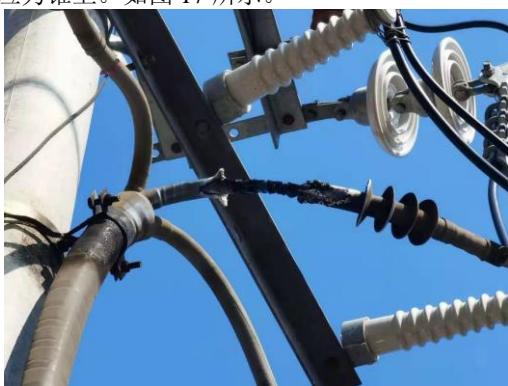


图 16 杆上电缆故障情况

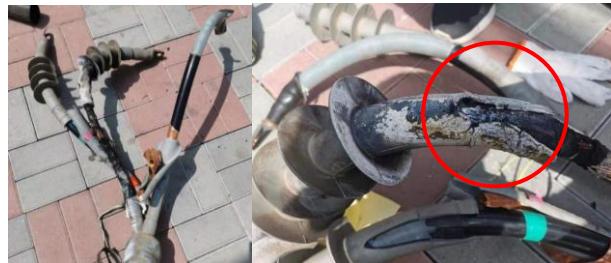


图 17 电缆终端三相应力锥弯折严重

将非故障相冷缩终端应力锥切开，发现应力锥安装尺寸存在明显偏差，冷缩应力锥未与电缆外半导电断口形成有效搭接，造成断口处电场集中，未起到均匀电场的作用。如图 18 所示。造成应力锥安装错位的原因是施工人员未按照安装工艺要求进行安装，外半导电层剥除长度过长。



图 18 电缆终端应力锥安装尺寸明显错误

继续解剖发现，电缆外半导电断口切断时工艺不良，造成断口不齐、毛刺较多，并且环割断口时存在下刀过深的情况，造成绝缘划痕较深，受损严重。此外，外半导电断口处未打磨与主绝缘平滑过渡。如图 19 所示。

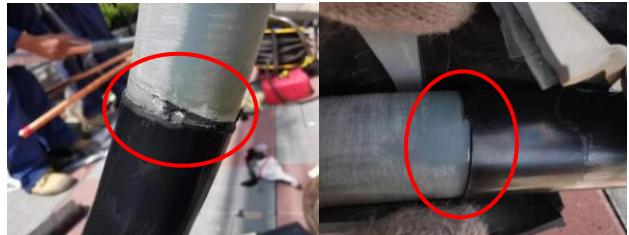


图 19 电缆外半导电断口工艺不良

在非故障相的冷缩终端应力锥内侧与外半导电断口搭接位置发现了局部放电痕迹，如图 20 所示。



图 20 电缆终端应力锥内侧放电痕迹

图 21 将故障相与非故障相同一位置进行对比发现，此次故障位置自外半导电断口处放电，并向下沿面放电至接近三叉手套处，最终对地放电导致零序保护动作。

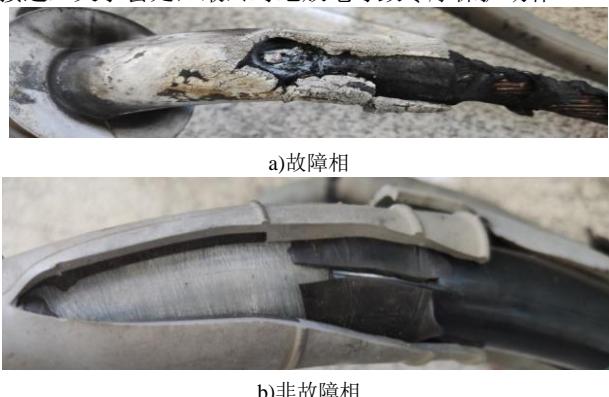


图 21 故障相与非故障相同一位置对比

## 5 结论与展望

通过对城区典型配电电缆热缩中间接头、冷缩中间接头及终端头三类故障案例的系统研究，可以得出以下结论：电缆接头与终端作为配电电缆系统中最关键且最薄弱的环节，其安装工艺质量直接决定了电缆线路的安全性和可靠性。分析结果表明，电缆接头故障的主要原因包括密封不严导致进水受潮、应力控制措施不当、半导电层与绝缘断口处理不规范、导体压接不良以及安装尺寸偏差等。这些因素易造成局部电场畸变、局部放电及绝缘老化，最终引发击穿故障。据统计，因施工工艺不良导致的接头故障占全部电缆运行故障的 70% 以上，成为影响城市配电网安全运行的重要因素。

针对上述问题，应从施工质量、技术管理和运行监测

三方面着手改进。一是严格执行电缆附件制作及安装的标准化工艺流程，强化施工现场质量控制，确保接头的密封、防潮及应力控制措施到位；二是加强施工人员的技术培训和操作考核，提高其对交联聚乙烯电缆结构特性及电场控制原理的理解，减少人为工艺缺陷；三是建立完善的运行状态监测与评估体系，利用局部放电检测、红外测温、智能在线监测等手段，实现对电缆接头潜在故障的早期预警和预防性维护。

未来，随着智能电网和数字化配电系统的发展，电缆故障诊断将逐步向智能化、预测化方向演进。基于人工智能、大数据及物联网技术的电缆运行状态监测与风险评估方法，将为电缆系统的寿命管理和运维决策提供技术支撑。通过持续优化电缆附件设计、改进施工工艺及提升智能监测水平，可有效提升配电电缆系统的安全性与稳定性，为城市电网的高质量运行提供可靠保障。

## [参考文献]

- [1] 刘浩然,王志国.电缆附件安装工艺缺陷与绝缘故障关系研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(22):92-98.
  - [2] 陈建峰,张明.配电电缆常见故障及防范措施分析[J].电气技术,2021(8):34-38.
  - [3] 朱启林,李仁义,徐丙垠.电力电缆故障测试方法与案例分析[M].北京:机械工业出版社,2008.
- 作者简介：丁楠（1994.6—），女，学历：硕士，毕业院校：华北电力大学，所学专业：电气工程，目前职称：工程师；吕爽（1993.8—），性别：男，学历：硕士，毕业院校：华北电力大学，所学专业：电气工程，目前职称：工程师。