

# 27.5kV 电缆终端低温条件下气隙缺陷放电特性研究

刘伟迪

(中国铁路设计集团有限公司 300308)

摘要: 27.5kV 交联聚乙烯电缆作为目前铁路牵引变电所中用于电力设备间相互连接的重要装置, 其电缆终端在高寒地区击穿事故频发, 且大多因其内部气隙缺陷所引起的。本文以变电所内广泛使用的交联聚乙烯电缆终端为研究对象, 模拟实际变电所内电缆终端运行工况, 开展了联络电缆终端的气隙缺陷放电特性试验。研究结果表明: 低温下气隙内放电起始电压显著降低, 放电过程发展缓慢, 气隙表面浅陷阱数目随时间变化而增多, 放电更易产生。

关键词: 电缆终端; 低温条件; 气隙缺陷; 放电特性

Study on Discharge Characteristics of Air Gap Defects in Substation Contact Cable Termination under Low Temperature Conditions

Liu Weidi

(China Railway Design Corporation, 300308)

Abstract: As an important device used to connect power equipment in railway traction substation, 27.5kV crosslinked polyethylene cable has frequent breakdown accidents in alpine regions, and most of them are caused by internal air gap defects. In this paper, the cross-linked polyethylene cable terminal which is widely used in the substation is taken as the research object, and the air gap defect discharge characteristic test of the cable terminal is carried out to simulate the operating condition of the cable terminal in the actual substation. The results show that the initial voltage of discharge in the air gap decreases significantly at low temperature, the discharge process develops slowly, the number of shallow traps on the air gap surface increases with time, and the discharge is more likely to occur.

Keywords: Cable termination; Low temperature; Air gap defect; Discharge characteristics;

## 0 引言

截至 2018 年年底, 全国的铁路营业里程达到 13.1 万 km, 其中高速铁路 2.9 万 km, 占世界高速铁路总量的 66.3%<sup>[1]</sup>。我国国土面积辽阔, 铁路系统必须具有适应多种复杂气候、地势的特性, 尤其伴随“八纵八横”铁路规划的不断完善, 在西北及东北等严寒地区将会有更多的变电所建设或投运, 如何保障这些寒冷地区所内电缆的安全可靠运行, 有效掌握其绝缘状态及性能, 将事关铁路运输及相关地区用电的运行可靠。

所内电缆的运行状况会受到外界环境的影响, 尤其是电缆终端部分, 由于其内部结构复杂, 电场分布极不均匀, 发生故障的概率大大增加。研究表明, 电缆内部绝缘气隙缺陷是导致故障发生的主要因素之一<sup>[2]</sup>, 气隙类缺陷普遍存在于各类电气设备的绝缘中, 是设备安全运行的巨大隐患, 为此国内外研究者对于设备绝缘内部缺陷局部放电特性及由此引发的材料老化机理进行了深入的研究<sup>[3-7]</sup>。文献[4-7]针对交联聚乙烯(XLPE)电缆接头部位气隙缺陷做了相关研究, 并提出使用无机纳米材料填充的方式进行局部放电的抑制。

本文搭建了低温局部放电测试系统, 采用实际使用的电缆制作了实验样品, 在终端部位模拟制作了绝缘轴向气隙缺陷, 并利用升高施加电压的方法加速气隙内局部放电的发展, 统计该过程中的局部放电信号, 对低温条件下局部放电发展特性进行了分析。

## 1 实验系统及方案

### 1.1 样品制备及环境条件模拟

为在实验室中尽量真实模拟电缆终端气隙缺陷在低温条件下的放电情况, 在本次试验中, 由专业电缆厂家定制了额定电压等级为 27.5kV 的交联聚乙烯单芯电缆作为试验样品, 并严格遵照应力锥型电缆终端制作工艺, 对其终端内部进行了气隙缺陷处理。该段电缆无中间接头, 仅有两侧终端, 分别连接了变压器和 GIS 设备, 变压器侧为直接接地方式, 而 GIS 侧则为经保护器接地, 终端的内部结构如图 1 中所示。

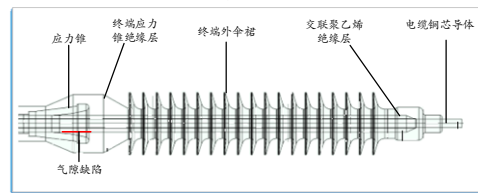


图 1 实验终端样品及其气隙缺陷制作

进行气隙缺陷的制作时, 在距离半导体层端口约 30mm 处, 使用刀具在绝缘层上制作出长、宽、深各为 100mm、1mm 和 1mm 的气隙缺陷, 如图 1 所示。然后在 XLPE 绝缘表面均匀涂抹硅脂, 使气隙与外界相隔绝, 并在外半导体层断口处使用应力疏散胶, 安装预制式冷缩应力锥紧密包覆绝缘层, 以改善该处的电场分布。

为研究低温条件下 XLPE 联络电缆绝缘层中气隙放电的特点及发展过程, 本文设计了电缆低温试验系统如图 2 所示。该装置可实现环境温度的快速变化及控制, 其调节温

度范围为 $-55^{\circ}\text{C}\sim 25^{\circ}\text{C}$ ，控制精度为 $1^{\circ}\text{C}$ 。在该装置内部有金属外壳进行屏蔽，可避免外界电磁环境对局放信号的干扰。

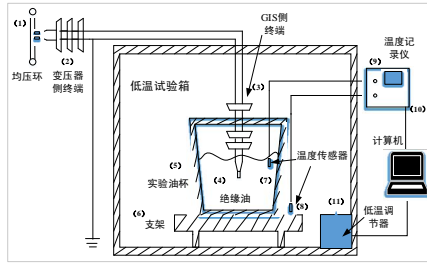


图2 低温实验系统示意图

### 1.2 实验过程设计

本文首先使用电缆绝缘低温试验系统，从室外温度 $30^{\circ}\text{C}$ 开始降温直至 $-40^{\circ}\text{C}$ ，并在 $-40^{\circ}\text{C}$ 下采用逐级升高电压的方法对试样进行加压实验，试样出现稳定的局部放电信号前，每隔 $1\text{min}$ 升高一次电压，加压幅度为 $1\text{kV}$ ；试样开始放电后，加压间隔变为 $60\text{min}$ ，加压幅度变为 $2\text{kV}$ 。本次试验使用的缺陷样品在低温下施加电压为 $13\text{kV}$ 时即出现放电现象，逐级升高至 $37\text{kV}$ 后，保持约 $40\text{min}$ 出现绝缘击穿，累积加压时间约 $760\text{min}$ 。试验过程中温度保持恒定，并将试验样品浸没在凝固点在 $-45^{\circ}\text{C}$ 以下的 $45\#$ 变压器矿物油中，以避免电缆试样两端发生电晕放电，影响试验效果。

## 2 实验结果

### 2.1 实验后样品击穿结果

本次实验过程中，当施加电压达到 $33\text{kV}$ 时，由局部放电检测仪采集到的放电脉冲序列均出现了明显增大，但基本保持稳定；当施加电压达到 $37\text{kV}$ ，放电信号波形呈明显增大趋势。临近击穿前，信号波形保持与前一时刻相似，但可听到试样一端出现持续“噗噗”声音，该现象持续 $10\text{min}$ 后，局放仪采集屏上图像紊乱，在试样中设置缺陷的部分迸射出火花，外层应力管被烧蚀，出现烧蚀孔洞。



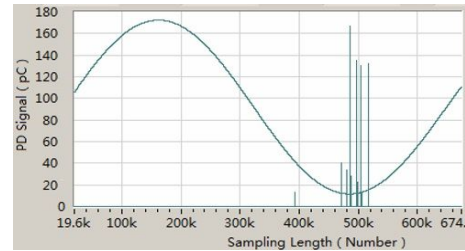
图3 含气隙缺陷的样品放电及击穿结果

观察电缆试样表面，发现在气隙绝缘前端，有明显击穿孔洞并伴有烧蚀痕迹。如图4所示，为终端试样的交联聚乙烯绝缘层在击穿破坏后的状况，应力管的破坏区域主要集中在外半导体层截断处，推测在该处为缆芯高电位电极与铜屏蔽层低电位电极的贯通点，放电和发热现象严重。

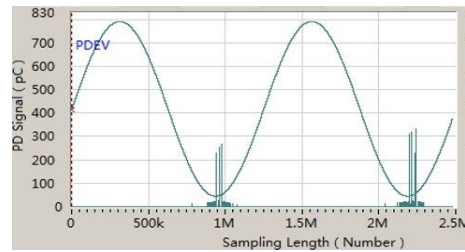
### 2.2 单周期内放电脉冲序列变化

本文使用高频示波器对交联聚乙烯联络电缆试样在放电过程中出现的放电脉冲波形进行了检测和采集，根据放电脉冲序列按照出现先后顺序，可大致分为3种，在不同的脉冲序列间，放电幅值、相位及频次等具有明显的“突变”现象。放电过程中的放电脉冲序列及与之相对应的“突变”特性如图4所示。

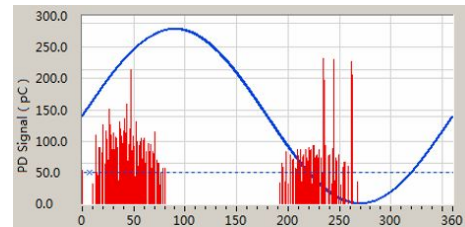
在 $0\sim 300\text{min}$ 时间段内，放电脉冲序列首先在负半周期出现，且在峰值附近出现的概率较大，偶尔会有脉冲信号在 $240^{\circ}\sim 260^{\circ}$ 之间出现；



(a) 300min



(b) 480min



(c) 600min

图4 不同时刻下局部放电脉冲序列图

$300\text{min}\sim 600\text{min}$ 时间段内，负半周期密集出现较多的小脉冲，脉冲出现的范围逐渐扩展至 $220^{\circ}$ 附近，在正半周期开始出现较大的单根放电脉冲，脉冲幅值较大，但分布稀疏；

随着加压时间继续延长， $600\text{min}$ 后，正负周期均出现较多的放电脉冲，正半周期出现的脉冲幅值普遍偏大，但分布仍较为稀疏，负半周期的脉冲密集，且出现的范围扩展至 $180^{\circ}$ 附近，该趋势随着施加电压的增大愈加明显，直至试样出现击穿。

### 3 局部放电发展阶段特征统计

为进一步研究XLPE联络电缆终端内部气隙缺陷的放电发展过程，分别对上述图6中的局部放电信号进行了相位统计分析，构建起局部放电脉冲电流信号的 $\phi-q-n$ 二维散点谱图。本文中工频相位 $\phi$ 等分为 $360$ 个区间，并统计单位时间（文中以 $5\text{min}$ 为单位时间）内每一区间上的平均放电次数 $n$ 、平均放电量 $q_m$ 的相关信息。

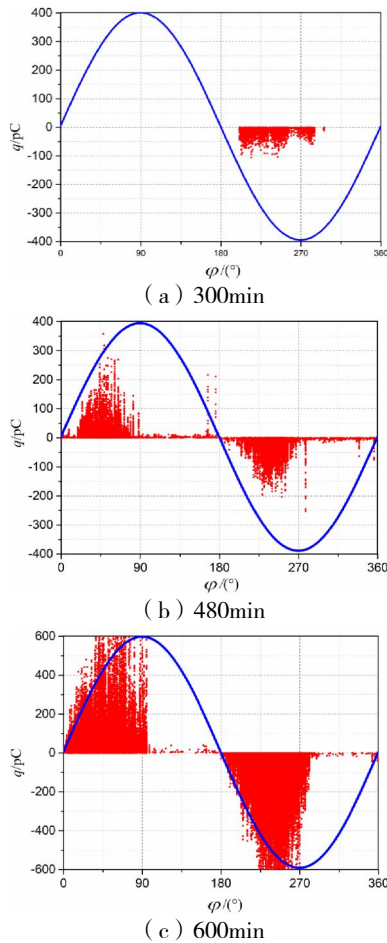


图5 不同时刻条件下联络电缆终端放电相位谱图

图5a为工频电压作用下, 电缆终端内部气隙在300min的相位统计谱图, 此时放电主要集中在负半周期峰值位置 $240^{\circ}\sim 290^{\circ}$ , 放电频次与平均放电量特征分布呈现尖峰状, 正半周期的放电频次较少。由此可知, 气隙缺陷内部的放电过程处于引发阶段, 放电的产生除了与此时气隙内电场强度密切相关, 可激发电子雪崩过程的初始电子产生概率对局部放电的发生具有重要的影响。

480min时刻的谱图如图5b所示, 正负半周期的分布形貌特征具有对称性, 且局部放电主要分布在工频电压的上升区段, 放电相位分布逐渐向 $0^{\circ}$ 和 $180^{\circ}$ 扩展。根据以上放电特征判断, 此时局部放电处于发展阶段, 放电频次与放电相位宽度在负半周较大, 正半周的放电幅值。

图5c为600min时, 含气隙缺陷的XLPE联络电缆终端在正负半周期的放电分布形貌特征, 由图中可以看出, 该时刻谱图与480min时较为相似。在该阶段, 气隙缺陷的相位谱图虽有明显增大, 但在增大后均保持平稳状态, 直至击穿现象出现。

#### 4 结论

通过分析严寒环境下变电所内XLPE联络电缆终端内部气隙缺陷引发的电缆故障问题, 对实际运行中的电缆终端实验样品的气隙缺陷局部放电过程进行了研究, 得到了如下结论:

1) 气隙缺陷内部的局部放电现象会呈现明显的阶段特征, 局部放电特征量随时间会出现“突变”现象, 放电重复率、放电量以及相位宽度等均随阶段发展而相继增大。

2) 低温条件下终端内部缺陷的放电特征谱图正、负半周的不对称度随局部放电的发展逐渐下降, 即在起始阶段, 放电主要集中在负半周期, 在发展阶段和临近击穿阶段, 放电在正负半周期增长明显, 相位分布逐渐趋于对称。

3) 低温条件下局部放电相位特征图谱及放电特征量的变化特点, 可综合起来对电缆终端内部气隙缺陷的发展程度进行评估。

#### 参考文献

[1]蒋先国, 古晓东, 邓洪, 等. 基于微动理论的整体吊弦损伤机理及优化研究 [J]. 铁道学报, 2019, 41 (6): 40-45.

[2]魏占朋, 王荣亮, 林国洲, 等. 变电站内联络电缆局部放电检测及解体研究[J]. 山东电力技术, 2018, 45 (9): 76-80.

[3]程序, 陶诗洋, 王文山. 一起110 kV XLPE 电缆终端局放带电检测及解体分析实例 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (3): 44-57.

[4]Longlei Bai, Lijun Zhou, Lini Li, “Partial discharge of cable termination on electric multiple unit of China high-speed railway below zero-degree centigrade”, IET Science, Measurement & Technology., Vol. 13, pp. 912-921, 2019.

[5]万利, 周凯, 李旭涛, 等. 以电场特征理解电缆终端气隙的局部放电发展机理[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3709-3716.

[6]周凯, 吴科, 万利, 等. 无机纳米颗粒抑制中压电缆终端气隙缺陷局部放电的有效性[J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 230-238.

[7]B. Florkowska, M. Florkowski, J. Roehrich, P. Zydron, Partial discharge mechanism in a non-uniform electric field at higher pressure[J]. IET Science, Measurement and Technology, 2011, 5(2): 59 - 66.