

高压电缆缓冲阻水层劣化机理及评价技术研究

徐晓峰

(上海电缆研究所有限公司 特种电缆技术国家重点实验室, 上海 200093)

摘 要:针对高压电力电缆半导电缓冲层技术现状,对阻水带材特性、半导电缓冲层设计、相关制造工艺进行展开分析,归纳各环节与电缆成品缓冲层性能的相关因素,论述各因素的风险与累积影响。基于高压电力电缆外层屏蔽结构,提出高压电力电缆半导电缓冲层间接触评价方法与技术实现,基于批量样品的测评与统计,给出半导电缓冲层间电接触性能劣化分级。最后提出高压电缆缓冲层改进方向与可靠性提升建议。

关键词:高压电力电缆;半导电缓冲层;阻水;电接触

中图分类号:TM247

文献标志码:A

文章编号:1672-6901(2023)06-0026-04

Study on Deterioration of Semi-Conductive Buffering Layer for High Voltage Cables and Evaluation Technology

XU Xiaofeng

(State Key Laboratory of Special Cable Technology, Shanghai Electric Cable Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

Abstract: Focus on the semi-conductive buffering layer within high voltage power cables, the deterioration mechanisms of water-blocking semi-conductive buffering tapes, buffering layers and manufacturing process were analyzed, and the risks and cumulative effects of each factor were discussed. Based on the outer screen structure and the interlayer electrical contact pattern within high voltage power cables, the quantification method and realization of electric contact were proposed, and the contact range level of the semi-conductive buffering layer of high voltage power cable was presented. The solution of deterioration factors, simplified risk accumulation mode, and methods for designing and engineering mitigation of semi-conductive buffering layers were summarized.

Key words: high voltage power cables; semi-conductive buffering layer; water-blocking; electrical contact

0 引 言

110(66) kV 及以上挤包交联绝缘高压电力电缆实现国产化已超过 30 年。从屏蔽结构型式角度,高压挤包绝缘电力电缆基本采用皱纹铝套作为金属屏蔽;缓冲层位于皱纹铝套与绝缘线芯之间,由半导电带绕包制成。基于合成纤维非织造技术的半导电缓冲带始于二十世纪 90 年代,这类材料最早为欧洲和日本进口。进入二十一世纪,国内非织造布企业 and 专业电缆材料企业进入这一领域,带材逐步实现国产化,替代以往的半导电橡胶带,成为高压电缆缓冲层的常用材料选择。

“十五”期间,考虑敷设环境中水分的影响,华东地区和华南地区半导电缓冲层及带材纵向阻水的典型设计要求,并影响到其他区域和用户的选型。

“十一五”以来,纵向阻水成为 110(66) kV 及以上电力电缆的典型要求,在实际应用总量中占比超过 90%。同期在役电缆缓冲层会出现白斑、烧蚀和主绝缘击穿的问题逐年增多。据不完全统计,“十三五”期间,这类异常和击穿事件每年超过 15 次,电压等级涵盖 110 kV、220 kV 和 500 kV^[1]。半导电缓冲层是高压电缆绝缘系统的有机组成、电缆系统接地的内在延伸,其重要性不容忽视^[2]。由于应用条件特殊性,这类带材需要针对性设计选型,不能忽略或直接简单套用 JB/T 10259—2014 标准^[3],基于此,本工作对高压电力电缆缓冲阻水层劣化机理及评价技术进行了研究。

1 半导电缓冲带材特性

按材料分类,半导电缓冲带可分为丁基橡胶、纤维黏合、金属丝混编等;按结构划分,可分为双面和单面;按使用特性,可分为阻水和非阻水。重点讨论高压电力电缆常用的单面半导电缓冲阻水带。该类带材衬底为非织造布(无纺布),其上黏合纤维,并

收稿日期:2022-12-22

作者简介:徐晓峰(1978—),男,博士,高级工程师。

E-mail:xuxiaofeng@secri.com

加入炭黑、阻水粉(主要成分为聚丙烯酸钠)等,经分切、成盘,形成具有一定强度和弹性的连续带材,成为目前缓冲阻水层的主要材料。

从电缆设计选材视角,带材生产过程需要保持纤维材质和成型工艺稳定,实现纤体三维“碳桥”微结构稳定。半导体缓冲阻水带内部的炭黑、阻水粉保持批次稳定,在纤体中分散均匀;阻水粉应接近中性,实现半导体和阻水性能的平衡。纤维层与非织造衬底结合良好,使带材保持稳定的抗张强度和弹性。受基础材料、微观结构和成型等因素影响,不同来源的缓冲阻水带材体现出一定指标差异;从故障或异常成品取下的带材,其体积电阻和表面电阻增加更为显著。在 23 ℃ 条件下,标称厚度为 2.0 mm 的 4 个不同半导体缓冲阻水带样品的体积电阻率平均值见图 1。样品 1~3 为不同企业带材的原始样品,样品 4 取自缓冲层故障的 110 kV 在役电缆。

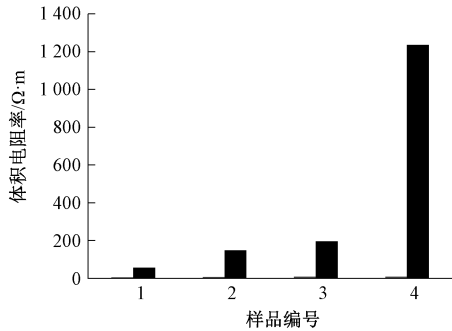


图 1 带材体积电阻率

由图 1 可以看出,样品 4 对应半导体缓冲带的体积电阻率显著增大,达到原始带材的 5~10 倍及以上。

缓冲带结构蓬松,在选材时须控制其尺寸和电阻水平范围。带材体积电阻率与厚度、压力的关系,可作为评价带材电气稳定性和批次一致性的重要依据。在 23 ℃ 条件下,标称厚度为 1.5 mm 的半导体缓冲阻水带材样品在厚度方向挤压时,体积电阻率变化情况见图 2。

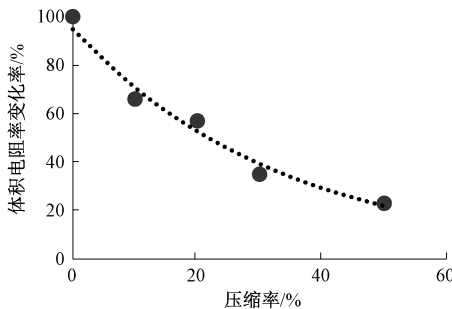


图 2 带材受压时的体积电阻率变化率

由图 2 可以看出,在带材受压厚度减半时,体积

电阻率显著下降,约为初始值的 23%。

阻水带材吸入水分时,内部聚丙烯酸钠的阴离子基团出现离子现象,分子链增长,表现出白色团聚、凝胶化、带材膨胀,从而填充内部微隙和层间隙,带材膨胀增厚,阻隔环境水分纵向侵入。这一反应过程不可逆,将引起炭黑聚集状态变化,隔阻其导电通道,致使带材整体电阻水平较干燥状态时增大。试验发现,对于含水率较高的带材,体积电阻率增加 10 倍甚至数十倍。带材吸水后即使再次干燥,其体积电阻水平仍比初始干燥状态大,回弹性也会下降。对于吸湿的成品高压电缆,缓冲层带材中的聚丙烯酸钠和极性杂质遇水产生 OH^- 、 Na^+ 等,与周边空气中的二氧化碳和邻近的铝套产生混合反应,逐渐生成白色不导电的氧化铝、碳酸钠等。

2 影响半导体缓冲层质量的因素

从设计角度,缓冲层需要综合考虑电、机械、热等因素,与绝缘屏蔽、皱纹铝套实现连续、分布、一致的电气接触。半导体缓冲层的绒面与皱纹铝套的波谷部位紧贴,波峰部位为脱离状态,近似“线接触”。这与平滑金属套(如铅套)电缆的“面接触”有显著区别。缓冲层厚度设计考虑负荷产生的线芯膨胀,综合带材受压变形。因此,若采用典型的单面半导体缓冲阻水带绕包结构时,铝套内一般设计为负间隙。

从制造角度,有关的工序包括缓冲带材绕包和铝套成型。绕包工序中张力和旋转作用对缓冲带造成一定形变、脱粉,后续流转、展放也将累积作用,影响整体外径和结构稳定性,需要对工艺进行细化确认。铝套成型工艺需要考虑实际缓冲层厚度波动,细化电缆规格,确认配模尺寸及工艺。特别指出,车间湿度对缓冲阻水层性能的影响不容忽视。绕包后的半成品应尽快进入金属套工序。若工序间等待时间大于 8 h 或湿度大于 80%,须在其表面包覆挡潮层。铝套成型后,两端也应立即密封。

考虑成品流转和敷设环节,弯曲和展放过程使缓冲层承受挤压和张力的作用。受重力和应力的影响,平直电缆仅绝缘线芯底部或侧边部分与皱纹铝套接触;对于弯曲电缆段,曲率半径较大一侧的内间隙减小、缓冲层受压,将增强与皱纹铝套贴合程度。根据现有的缓冲层异常统计,大部分出现故障的电缆为穿管或沟道内平直敷设,少量为隧道内蛇形敷设,因此需要变更缓冲带材和工艺调整并进行相应的性能稳定性验证。成品电缆缓冲阻水层应保持低含水率,从而在轴向保持一定过渡电阻水平,实现分

布、间隔的有效电气连接。在终端和中间接头安装时,切开铝套露出缓冲层后宜连续作业,工序间歇须在端部包覆防潮膜。预制绝缘件边沿至铝套断口宜采取增强屏蔽、等位连接等措施。

在运行阶段,电缆接地电流沿径向和轴向流动,在铝套波谷位置出现明显收缩效应。若缓冲阻水层受潮,交流电流作用将会增强阻水带材内部的离子运动,加速阻水粉反应,并导致铝套或绝缘屏蔽腐蚀,使局部电阻增大^[2]。劣化区域的局部电阻将达到邻近区域电阻的 10 倍甚至更高。这一过程逐步由初始区域推及至周边,持续反应、累积和扩散。若出现暂态故障,缓冲层将承受相应的短时热-机械作用,以及可能的感应冲击电压。

3 异常分析与层间接触评价

3.1 缓冲层异常分析

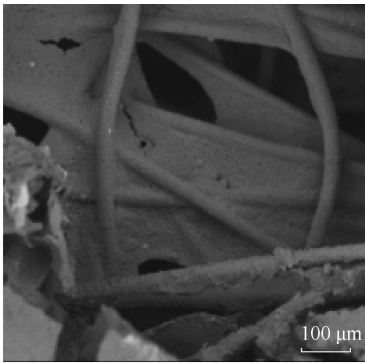
缓冲层位于金属套下,若运行环节出现劣化难以察觉,将导致难以预测的故障。这一过程一般会持续 3~10 a,一旦进入不可逆的快速劣化阶段,层间电接触性能显著下降,由缓冲带粉末析出过渡到缓冲层烧蚀、绝缘屏蔽层受损。绝缘屏蔽界面的损伤将导致局部场强集中,最终出现主绝缘被击穿。

缓冲阻水层劣化一般呈现以下情形:①缓冲带表面纤维松散、脱落,绕包外径变化较大,搭盖部位或铝套波谷接触部位无回弹性,对应局部厚度明显变小。②部分电缆缓冲层与铝套间隙较大,短样品的线芯可轻易抽取;或者缓冲层厚度较大,带材绕包层间松弛。③带材表面成片泛白,可见粉末状析出物;严重时出现贯穿烧蚀孔洞,且绝缘屏蔽有凹坑状损伤。④烧蚀位置一般出现在铝套底部和侧面的波谷部位。烧蚀在缓冲层内侧和外侧均可能出现;对应的铝套内壁一般也会出现氧化变色甚至黑色放电的痕迹。

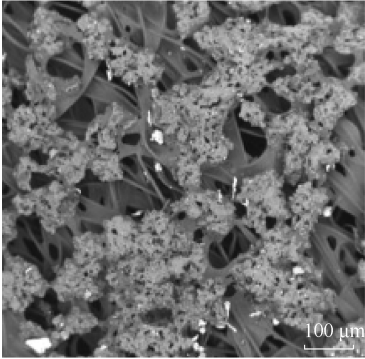
原始阻水带材和故障电缆带材的扫描电镜 (SEM) 见图 3。

由图 3 可知,原始带材中的炭黑分布均匀,导电通道立体致密;异常时白色析出物团聚,造成明显的表面和内部通道隔阻。受潮成品电缆的缓冲层不同劣化阶段表面析出状态见图 4。

由图 4 可以看出,受潮成品电缆的缓冲层表面的白色物质由局部点状向连续成片变化。一旦在役电缆绝缘屏蔽与缓冲层界面发生烧蚀,挤包屏蔽界面出现不可逆的损伤,挤包绝缘屏蔽表面烧蚀见图 5,界面电场局部集中、持续放电,并向导体屏蔽方向快速发展。

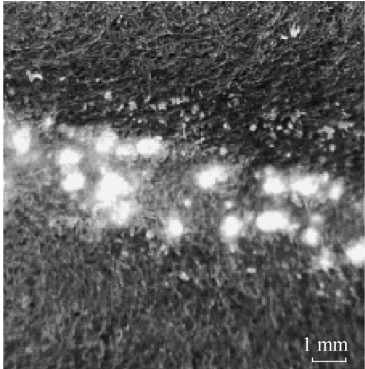


(a) 原始阻水带材

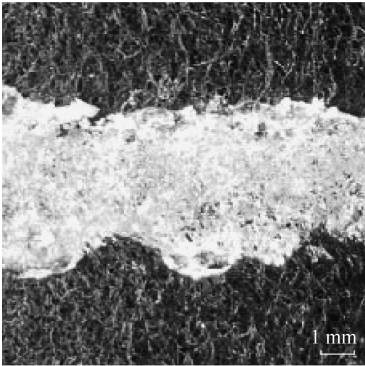


(b) 故障电缆带材

图 3 带材 SEM 微观图



(a) 点状白斑



(b) 片状白斑

图 4 阻水缓冲层表现变化

试验对 10 根缓冲阻水层异常导致故障的高压电缆样品,进行多因子风险叠加分析,包括带材成分、含水量、带材电阻、层间间隙等。试验发现,大部

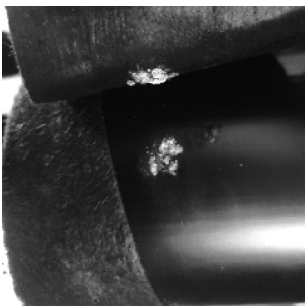


图 5 挤包绝缘屏蔽表面烧蚀

分故障样品出现了不少于两个因子的显著异常。两个以上因子偏离的叠加使风险系数显著增加,无一例外导致本体故障。这证实了缓冲层选材一致性、设计与工艺控制稳定性的重要作用。

3.2 层间接触评价方法

从缓冲层材料和结构来看,良好的异质层间接触至关重要,甚至对于其可靠性是有决定意义的,有必要对缓冲层材料、绕包结构、层间间隙的综合性能予以定量评价,反映成品平直时界面压力状态下绝缘屏蔽与金属套之间的局部电流收缩和整体电接触水平^[4]。已经开发缓冲层间接触电阻特性评价方法,同时研制了诊断试验设备,见图 6。

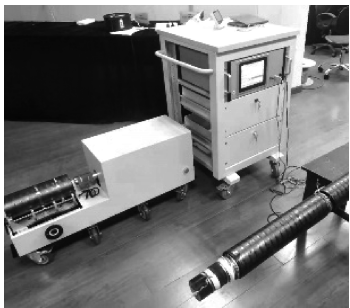


图 6 缓冲层间接触性能综合测试设备与连接

这套设备一般在试验室环境下使用,包括主机、缓冲层接触电阻模块、缓冲层摩擦力模块、带材性能模块,测试对象包括短端成品电缆和缓冲层带材。

该方法可测得电缆绝缘屏蔽与金属套之间的接触电阻,并归一化为接触电阻率($\Omega \cdot \text{m}^2$),进行不同规格、缓冲层和金属套类型的比较。直流测试条件可减小环境干扰和样品变化影响,接触电阻率指标具有较好的稳定性和重复性。作为扩展,可测试电缆绝缘线芯与金属套相对滑移时的最大静摩擦力,评价层间结构与间隙配合的一致性。

采用接触电阻测试方法,完成高压电缆测评组批次测评,包括不同规格、金属套和缓冲层形式。对接触电阻率数据(23℃)进行统计归集,表达为箱式图形式,可作为高压电缆缓冲层风险分级参考,见图 7。“较好”的一级数据较为集中,测试值小于

$25 \Omega \cdot \text{m}^2$,除了选材和设计良好的纵向阻水电缆,还包括非阻水、铜丝混编带、平滑金属套等类型。“一般”的一级测试值为 $70 \Omega \cdot \text{m}^2$,超过 50% 样品处于这一级。“异常”一级包括缓冲层异常导致的故障电缆,数据分散较大,测试值为 $100 \sim 200 \Omega \cdot \text{m}^2$ 。异常样品不仅包括常见的缓冲阻水带类型,还包括缓冲阻水带+铜丝混编带类型。

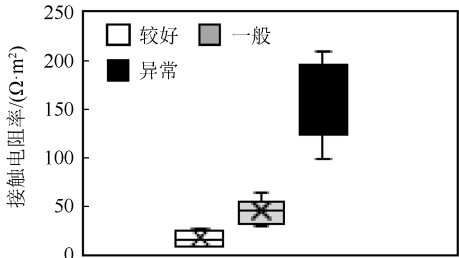


图 7 基于接触电阻率的风险分级(箱式图)

4 结束语

本工作提出的层间接触评价方法可有效支撑高压电缆缓冲层改进,已通过批次验证,形成综合诊断程序和参考判据。结论概要及相关建议如下:

1) 缓冲层带材选择

根据电缆线路环境合理选择缓冲层带材。若环境水分影响可控,宜选用非阻水类型。参照中国电器工业协会发布的缓冲层绕包带材标准 T/CEEIA 610-2022,可对带材质量有效管控,指导选材、设计和批次性能测评^[5]。

2) 缓冲层设计与生产

需要开展高压电缆缓冲层设计与制造专项技术提升。分析缓冲层间隙设计,合理设定绕包层厚度,实现线芯与金属套间的连续良好配合。必要时,对皱纹铝套和缓冲层绕包结构进行改进,包含缓冲层内外带材、绕包外径、皱纹铝套波谷内径及工艺偏差、设计压力下绕包层永久形变等。结合层间接触电阻性能,开展必要的实配工艺验证和试验验证,综合考虑带材稳定性、成品电接触性能和纵向阻水性能(若有)。

对于电缆制造环节,加强电缆车间缓冲带绕包和金属套工序的管理和控制,关注环境水分对阻水带材及相关工艺的影响。在绝缘线芯流转暂存工序中,应重视周边环境及湿度的影响,及时采取挡潮或除湿措施,抑制缓冲层吸潮过程。

除了目前普遍采用的皱纹铝套结构,建议积累平滑铝套、“铜丝屏蔽+铝塑复合护层”的生产工艺和应用经验,作为常规线路设计的潜在选项。

(下转第 33 页)

3 结束语

本工作介绍了 2 500 mm² 铜分割导体可行的焊接方法,对比分析了预制式中间接头和软接头的特点,并设计了针对导体焊接质量验证的试验方案,从直流电阻变化、抗拉强度、运行发热情况进行了验证。综合分析,分割导体焊接后的直流电阻仍需要进一步优化,根据国内外相关文献报道及实际工程应用,目前分割导体均采用爆炸焊方式进行焊接,暂无其他较好替代方法。因此,优化电阻的关键在于提升焊粉的质量,焊接铜材的焊粉一般为铜、氧化铜、铝、镁混合物。此焊粉主要用于焊接铜板或铜棒等接地装置。目前,尚无专门针对电缆铜导体焊接用途的焊粉,希望相关焊粉厂家关注电缆铜导体焊接的需求,研发出低电阻率焊粉,推动电缆行业的进步,为同类产品焊接提供参考。

(上接第 29 页)

3) 安装敷设

在线路工程环节,按作业指导规范进行电缆敷设和附件安装。电缆敷设过程保持端封和外护层完好;附件安装时,剥开铝套的区段后及时包裹;若有铜丝编织带,铜丝应在端部与铝套可靠焊接。

参考文献:

[1] WU Z H, LAI Q B. Analysis of influencing factors on buffer layer discharge for high-voltage XLPE cable [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(20): 4142-

参考文献:

[1] 张洪亮, 张建民, 于洪森, 等. 高压电缆大截面分割导体焊接后的机械性能及缓冲阻水层设计 [J]. 电线电缆, 2018 (4): 36-39.
[2] 陆伟, 夏云海, 侯虹剑, 等. 500 kV 交联聚乙烯绝缘电缆用 3 000 mm² 铜分割导体的研制 [J]. 电线电缆, 2022(5): 38-41.
[3] 张亚强. 浅析高压电力电缆中间接头制作工艺对其绝缘性能的影响 [J]. 农村电气化, 2021(10): 18-21.
[4] 高凯, 陈龙啸, 杨黎明, 等. 海底电缆软接头导体快速焊接方法 [J]. 电线电缆, 2016(6): 14-17.
[5] 中华人民共和国机械工业部. 电线电缆电性能试验方法 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
[6] 中国电器工业协会. 额定电压 220 kV (U_m = 252 kV) 交联聚乙烯绝缘电缆及其附件 第一部分: 试验方法 和要求: GB/T 18890. 1—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

4157.
[2] 赵琦, 周凯, 孔佳民, 等. 高压 XLPE 电缆阻水缓冲层烧蚀机理研究现状 [J]. 绝缘材料, 2022, 55(4): 20-28.
[3] 上海电缆研究所. 电缆和光缆用阻水带: JB/T 10259—2014 [S]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
[4] 施楠楠, 徐晓峰, 夏俊峰. 高压电缆半导电缓冲层新型评价方法探讨 [J]. 电线电缆, 2021(4): 9-10.
[5] 上海电缆研究所. 额定电压 110 kV 及以上电力电缆缓冲层用半导电包带: T/CEEIA 610—2022 [S]. 北京: 中国电器工业协会, 2022.

欢迎广大读者为本刊撰写稿件!
欢迎广大读者给本刊提出建议!