

高压电缆用半导体缓冲阻水带性能研究

张洪宇, 施楠楠

(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: 高压电缆用半导体缓冲阻水带在高压电缆已应用多年,但其性能研究却少有报道,试验选取市面 A、B、C 3 个不同厂家阻水带样品进行性能研究,对其吸水性、电性能、机械性能及老化性能进行试验。结果表明:阻水带随着老化温度的增加,伸长率及强度也有增加的趋势;样品老化后吸水膨胀变化较大,样品 B 在 135 °C 环境下老化,基本失去了吸水功能;总体上样品 B 在 90 °C 环境下表现较为优异;样品 A 和样品 C 电阻较高,老化后吸水能力及电性能明显降低;样品 B 老化后电性能变化较小,样品 A 和样品 C 体积电阻变化较为明显,为高压电缆的失效带来了潜在的风险。

关键词: 高压电缆; 半导体阻水带; 老化性能

中图分类号: TM215.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-6901(2022)04-0032-03

Study on Performance of Semi-Conductive Buffer Water Blocking Tape for High Voltage Cable

ZHANG Hongyu, SHI Nannan

(State Key Laboratory of Special Cable Technology, Shanghai Electric Cable

Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

Abstract: The semi-conductive buffer water blocking tape for high voltage cable has been used for many years, but its performance research is rarely reported. The performance of water blocking tape made by excellent manufacturers in the market was studied, and its water absorption, electrical performance, mechanical property and aging performance were tested. The results showed that: with the increase of aging temperature, the elongation and strength of the water blocking tape also had an increasing trend; after aging, the water absorption expansion of the sample changed greatly, and B basically losted the water absorption function when aging at 135 °C; in general, sample B performs better at 90 °C; samples A and C had too high resistance, and the water absorption capacity and electrical properties changed obviously after aging.

Key words: high voltage cable; semi-conducting resistance hose; aging performance

0 引 言

高压电缆用半导体缓冲阻水带简称“阻水带”,由两层无纺布带中间加一层膨胀阻水粉组成的,阻水带应用于高压电缆绝缘屏蔽层和铝波纹管铠装层之间,起到电气连接的作用,降低绝缘表面电荷的富集,降低局部放电的可能;同时阻水带可填充铝波纹管,防止水进入铝波纹管护套,降低高压电缆水树等失效性能的发生^[1-5]。因此,阻水带是在高压电缆使用时降低电缆失效的有效辅助材料。

近年来,我国高压电缆不管在里程还是在运营维修方面增加了较大财力和物力,但是电缆线路每百千米故障率达 2%,其中电缆故障率为 0.08%,经

分析故障处会有阻水带的烧蚀现象发生^[3],因此对阻水带的性能研究势在必行。阻水带老化后的电学性能稳定性和物理性能稳定性极为重要,应选取市面上较为典型的阻水带进行基本性能及老化性能的研究。目前,阻水带产品的性能检测及分析比对鲜有报道。

本工作对不同厂家的阻水带进行含水率、吸水性、断裂强度、电阻、老化后的性能等试验,并对老化后的样品进行扫描电镜试验,通过分析,筛选出稳定性较高的阻水带样品。

1 样品及试验部分

1.1 仪器与样品

JSL-500N 型电子拉力机;CH-10-C 型多头测厚仪;300 mm 钢直尺,RL100 型老化试验箱;梅特勒-托利多 XS 104 型分析天平,WS270H 型高低温湿热试验箱;PHENOM PROX 型电镜。

收稿日期:2021-08-15

作者简介:张洪宇(1990—),男,工程师。

E-mail: zhanghongyu@secr.com

1.2 仪器工作条件

试验均在 $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ 、 $(45 \pm 5)\%$ 环境下进行。

选用 3 家同型号规格的阻水带产品,编号分别为 A、B、C,规格均为 $80\text{ mm} \times 2.0\text{ mm}$ (80 mm 为宽度, 2.0 mm 为厚度)。

1.3 试验方法

1.3.1 基础性性能试验方法

膨胀高度及膨胀速率试验采用 JB/T 10259—2014^[5]《电缆和光缆用阻水带》附录 C 中方法进行试验,试验选取 150 mL 水为基准;拉伸试验按照 GB/T 24218.3—2010^[5]《纺织品 非织造布试验方法 第 3 部分:断裂强力和断裂伸长率的测定》方法进行试验,试验环境需满足 GB/T 2941—2006^[6] 中温度和湿度规定;表面电阻按照 JB/T 10259—2014^[7] 中的要求进行试验;体积电阻率按照 JB/T 10259—2014^[7] 中的要求进行试验。

1.3.2 老化性能试验方法

(1) 温度老化 $90^\circ\text{C}/7\text{ d}$ 。

将 5 个试样置于 $(90 \pm 2)^\circ\text{C}$ 自然通风老化箱中,恒温 168 h 后取出,冷却至室温,老化后对试样进行拉伸试验、吸水试验、表面电阻,以及体积电阻测试。

(2) 温度老化 $135^\circ\text{C}/7\text{ d}$ 。

将 5 个试样置于 $(135 \pm 2)^\circ\text{C}$ 自然通风老化箱中,恒温 168 h 后取出,冷却至室温,老化后对试样进行拉伸试验、吸水试验、表面电阻、体积电阻测试。

2 结果与讨论

2.1 阻水带基础性性能

A、B、C 3 个不同厂家生产的同种规格的阻水带基础性性能试验结果见表 1。

表 1 样品 A、样品 B、样品 C 阻水带基础性性能试验结果

试验项目	样品 A	样品 B	样品 C
厚度/mm	1.44	1.59	1.62
单重/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	245.2	266.8	271.3
膨胀速率/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	9.3	11.0	13.4
膨胀高度/mm	24.8	16.0	21.5
吸水率(30°C , 85% 相对湿度, 处理 24 h)/%	15.9	18.5	13.5
断裂强度/($\text{N} \cdot \text{cm}^{-1}$)	69	107	71
断裂伸长率/%	13	14	13
体积电阻率/($\Omega \cdot \text{cm}$)	5 400	3 008	3 727

由表 1 可知:样品 B 类型的吸水能力及体积电阻优于样品 A 和样品 C,其吸水率 (18.5%) 最高,在电缆中吸收水分的能力最大,同时其体积电阻较

小,导出电荷的能力较优。样品 B 的断裂强度最高,为 $107\text{ N} \cdot \text{cm}^{-1}$,这为后续绕包在高压电缆绝缘工艺带来了便捷。

2.2 阻水带老化性能

2.2.1 老化后的拉伸试验

阻水带经过 90°C 和 135°C 环境下,老化 168 h 后拉伸试验的试验结果见表 2。

表 2 老化后拉伸试验结果

试验条件	试验项目	样品 A	样品 B	样品 C
$90^\circ\text{C} \times 168\text{ h}$	断裂强度/($\text{N} \cdot \text{cm}^{-1}$)	71	106	65
	断裂强度变化率/%	-2.90	0.93	8.45
	断裂伸长率/%	14	13	12
	伸长率变化率/%	-7.69	7.14	7.69
$135^\circ\text{C} \times 168\text{ h}$	断裂强度/($\text{N} \cdot \text{cm}^{-1}$)	69	112	70
	断裂强度变化率/%	0.00	4.67	1.43
	断裂伸长率/%	15	13	13
	伸长率变化率/%	-15.38	7.14	0.00

由表 2 可知, 90°C 老化后,样品 B 的断裂强度变化最小,表明该阻水带的无纺布结构及其微观结构相对较为稳定,加热后发生少量或未发生纤维黏连或者熔化的现象。样品 A 断裂强度增加 2.9% ,这可能是样品 A 受热,其无纺布纤维熔化黏连造成的。样品 C 断裂强度及伸长率变化较大,说明其受热老化后较不稳定。

135°C 老化后样品 C 的伸长率及断裂强度变化最小,表明样品 C 在 135°C 机械性能较优,更适合高温环境下使用,样品 A 和样品 B 的伸长率变化较大,样品 A 增加了 15.38% ,样品 B 减少了 7.14% 。样品 B 在 135°C 老化后的性能变化较大,表明样品 B 更适合低温环境下使用,随着老化温度的增加,样品 A、样品 B、样品 C 的强度及伸长率均有持续增加的趋势,这表明高温会造成阻水带中有机纤维的熔化,冷却后熔融纤维经过重结晶融合在一起,从而增加其强度和伸长率。

2.2.2 老化后的膨胀速率及膨胀高度

阻水带在 90°C 、 135°C 温度下老化后对其进行 150 mL 的吸水膨胀试验,吸水膨胀试验的试验结果见表 3。

由表 3 可知,3 种样品经受 90°C 、 168 h 的老化后,其吸水膨胀速率有较明显的下降,其中样品 A 和样品 B 下降变化率分别为 61.29% 和 40.91% ,样品 C 变化最小,为 7.46% 。当老化温度为 135°C 时,3 种样品的吸水膨胀率和膨胀高度下降率均超过了 50% ,其中,样品 B 的膨胀速率下降了 94.54% ,基本上不具备吸水的作用。如高压电缆长

表 3 吸水膨胀速率及高度试验结果

试验条件	试验项目	样品 A	样品 B	样品 C
90 ℃ × 168 h	膨胀速率/(mm · min ⁻¹)	3. 6	6. 5	12. 4
	膨胀速率变化率/%	61. 29	40. 91	7. 46
	膨胀高度/mm	15. 8	14. 9	19. 8
	膨胀高度变化率/%	36. 29	17. 60	7. 91
135 ℃ × 168 h	膨胀速率/(mm · min ⁻¹)	4. 0	0. 6	6. 5
	膨胀速率变化率/%	56. 99	94. 54	51. 49
	膨胀高度/mm	10. 0	6. 7	10. 1
	膨胀高度变化率/%	59. 68	58. 13	53. 02

时间异常升温,很可能造成半导体材料的失效。

2. 2. 3 老化后的体积电阻率

阻水带在 90 ℃ 及 135 ℃ 老化后的体积电阻率及体积电阻率相对原始值的变化率见表 4。样品 A 和样品 C 在 90 ℃ 及 135 ℃ 老化后的体积电阻率的变化率均超过了 10%,电阻增加得较为明显。阻水带老化后减弱了导电能力,电阻的增加较易造成绝缘屏蔽层和金属套之间形成电位差,阻水带上就容易产生电流,后续会增加阻水带温度,最终会因热量的缓慢冲击造成阻水带的破坏,同时金属层会被电蚀^[3]。因此,阻水带老化后的电性能至关重要,如变化较大势必会造成金属层的电蚀。

样品 A 和样品 C 老化后的电阻增加较为明显,虽然样品 B 135 ℃ 老化后吸水能力降低较为明显,但是其电性能变化最低,当高压电绝缘表面有电荷富集时,电荷可以较容易地将电荷运出去,不易造成绝缘和金属层的电压差,为高压电缆的正常运行提供保障。

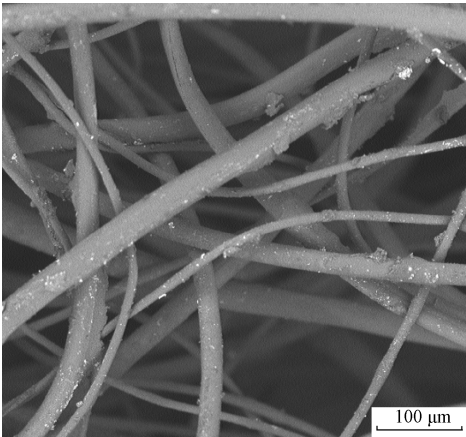
表 4 样品老化后的体积电阻率

试验条件	试验项目	样品 A	样品 B	样品 C
90 ℃ × 168 h	体积电阻率/(Ω · cm)	6 770	3 208	4 111
	体积电阻率变化率/%	-25. 37	-6. 65	-10. 30
135 ℃ × 168 h	体积电阻率/(Ω · cm)	6 442	3 217	5 055
	体积电阻率变化率/%	-19. 29	-6. 95	-35. 63

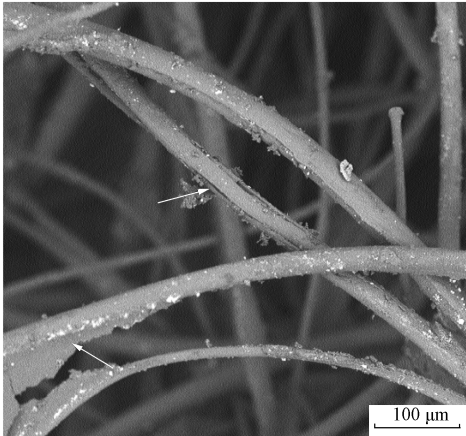
2. 2. 4 阻水带老化前后的 SEM 图谱

图 1 为阻水带 SEM 图谱。由图 1(a)可知,阻水带纤维老化前后表面变化较为明显。图 1(a)为阻水带未老化的微观图,阻水带纤维表面光滑,白色颗粒及不规则块状物为阻水粉。图 1(b)为阻水带老化后的微观图,可以较为明显地发现阻水带纤维表面有开裂或结块的现象发生,如箭头所指位置。

样品经 135 ℃,168 h 老化后对阻水带的微观结构具有一定的影响;阻水带的导电物质为石墨,石墨在高温空气环境下会发生一定的氧化反应,以及阻



(a) 未老化样品



(b) 135 ℃, 168 h 老化后样品

图 1 阻水带 SEM 图谱

水带纤维高温环境熔化及再结晶,造成了阻水带体积电阻增加。阻水带纤维表面开裂或结块现象的发生降低了阻水带的吸水能力,因此,阻水带老化后期吸水膨胀速率及高度大幅降低。

3 结束语

阻水带随着老化温度的增加,伸长率及强度也相应增加,这可能是高温将阻水带内部的纤维熔化黏连造成的;样品老化后吸水膨胀变化较大,样品 B 在 135 ℃ 环境下老化,基本失去了吸水功能;总体上样品 B 在 90 ℃ 环境下的表现较优异;样品 A 和样品 C 的电阻较高,老化后吸水能力及电性能变化较为明显;样品 B 老化后电性能变化较小,样品 A 和样品 C 体积电阻变化较为明显,为高压电缆的失效带来了风险。

参考文献:

[1] 张侠. 一种新型的电力电缆用半导体屏蔽阻水带[J]. 电线电缆, 2008(3): 33-35.
[2] 邓声华, 江章福, 刘和平, 等. 高压电缆缓冲层材料及结构特性研究[J]. 电线电缆, 2019(2): 19-27.

(下转第 40 页)

3.3 电容电流的流向

由表 5 中样号 1 和样号 2 数据、样号 4 和样号 5 数据可知:110 kV、378 m 电缆在接地点面积相同的情况下,单端接地在测量的接地点电容电流明显大于双端接地时的电容电流,有几乎 2 倍的关系,且波谷电流是波峰电流的 2 倍,说明当双端接地时,电容电流满足从波峰向两边的波谷处铝护套接触的位置流动(见图 1)。由表 6 也可以看到:220 kV、20 m 的电缆用同样方法所得的试验数据也有这样的表现形式,但由于电缆较短,这种现象不是很明显,这说明接地点的相对距离影响了电容电流的分布。表 6 中 220 kV 电缆在单端和双端接地的情况下,两个电容电流几乎相等。而 220 kV 绝缘中的电容电流,由于其绝缘厚度几乎是 110 kV 电缆绝缘厚度的一倍(110 kV 绝缘厚度 16 mm, 220 kV 绝缘厚度 24 mm),所以考虑在电极面积不同的情况下,220 kV 电缆的电容电流是 110 kV 的 1.72 倍,说明在电压相等时接地点单位长度上的电流 $I_{220}/I_{110} \approx 1.72$,但在表 5 中,没有看到这样的电流倍数,表现的结果是 110 kV 电缆在单点接地和双端接地时,接地电流均比 220 kV 电缆大。110 kV 电缆和 220 kV 电缆在 1.5 mm^2 接地线中的电容分别为 1.987×10^{-15} 、 $1.67 \times 10^{-15} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ 。按照理论计算,用式(1)对 110 kV 电缆结构计算可得这片缓冲层的电阻相当于 $2.08 \text{ M}\Omega$ (64 kV, 0.83 mA); 220 kV 电缆的接触电阻为 $8.64 \text{ k}\Omega$ (64 kV, 0.29 mA),可见此次试验用的 110 kV 和 220 kV 电缆的缓冲层接触电阻是非常大的。

4 结束语

根据上述计算和试验,高压电缆的缓冲层中的电容电流分布和电阻变化有以下几个特点:

(1) 高压电缆缓冲层中流动的电流虽然很小,但由于集中于很小的面积上,造成温度升高很大,实际测量和理论计算充分证实了这一点。

(2) 高压电缆线路在运行时,电缆线路的接地

方式会影响到电容电流的分布,造成电流的进一步集中,金属套单点接地的电容电流几乎是双端接地的 1 倍。但对于短段电缆而言,这一特性表现得不明显。

(3) 在高压电缆在模拟试验中,模拟电极上的电容电流小于理论计算的电容电流,原因在于绝缘屏蔽层串联的电阻在作用,该电阻达到几百千欧。

(4) 根据试验得到的结果,高压电缆缓冲层结构中以半导电丁基橡胶带加金布的效果最好,它能保证电缆在运行温度下始终保持在较低的接触电阻之下,而且半导电丁基橡胶带没有裸露的导电炭黑,不会和铝产生电化学反应,提高了电缆运行的可靠性。

参考文献:

- [1] 王伟,欧阳本红,徐明忠,等. 电缆缓冲层烧蚀初步分析[J]. 电线电缆,2019(5):33-35.
- [2] 赵刚,朱启动,陈文真. 操作波的参数计算方法[J]. 高压电器,2001,37(2):9-11.
- [3] 付艳红,马耐祥. 正极性操作波作用下介质表面闪络的发展特性[J]. 高压电器,1986(3):9-11.
- [4] 王伟,张静,郑建康,等. 合闸时陡波过程对中间接头击穿特性的影响[J]. 电线电缆,2018(5):26-31.
- [5] IEC 42 (secretariat) 102. IEC1083-2. Digital recorders for measurements in high impulse tests Part 2: Evaluation of software used for the determination of the parameters of impulse waveform [S]. Paris:IEC,1996.
- [6] 程守洙,江之水. 普通物理学:第 4 册[M]. 北京:人民教育出版社,1961.
- [7] 赵健康,范友兵. 高压电缆阻水缓冲层工艺和设计研究[J]. 电线电缆,2010(3):17-21.
- [8] 张侠. 一种新型电缆半导电阻水带[J]. 电线电缆,2008(3):33-35.
- [9] 李晨银,李洪泽,陈杰,等. 高压 XLPE 电缆缓冲层放电问题分析[J]. 电力工程技术,2018,37(2):61-66.
- [10] 张涵. 电缆缓冲层放电特性的研究[J]. 北京:电子技术与软件工程师,2015(6):241-242.
- [11] 张仁宇,陈昌渔,王昌长. 高压试验技术[M]. 北京:清华大学出版社,2009.

(上接第 34 页)

- [3] 王伟,欧阳本红,徐明忠,等. 电缆缓冲层烧蚀现象初步分析[J]. 电线电缆 2019(5):5-10.
- [4] 赵健康,樊友兵. 高压电缆缓冲层的设计与工艺研究[J]. 电线电缆,2010(3):17-21.
- [5] 全国纺织品标准化技术委员会. 纺织品 非织造布试验方法 第 3 部分:断裂强力 and 断裂伸长率的测定:GB/T 24218.3—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- [6] 全国橡胶与橡胶制品标准化技术委员会. 橡胶物理试验方法 试样制备和调节通用程序:GB/T 2941—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [7] 全国电线电缆标准化技术委员会. 电缆和光缆用阻水带:JB/T 10259—2014[S]. 北京:机械工业出版社,2014.