

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.06.020

高压 XLPE 电缆缓冲带动态导电特性与机理

门业堃¹, 张竞成², 郭卫¹, 高建³, 李建英³, 俞飞⁴

(1. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075; 2. 国网北京市电力公司, 北京 100031; 3. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049; 4. 沈阳天荣电缆材料有限公司, 辽宁 沈阳 110027)

摘要: 高压交联聚乙烯(XLPE)电缆缓冲层烧蚀是近年来受到广泛关注的电缆故障类型。缓冲层烧蚀通常在受到挤压以及吸收水分的情况下发生, 因此研究压强和吸水对于缓冲层烧蚀的影响机理具有重要意义。文中针对干燥和吸水的阻水缓冲带(简称缓冲带)在不同压强下开展模拟实验, 以获得缓冲带电流密度、电压以及交流体积电阻率在烧蚀过程中的动态变化规律。同时, 采用扫描电子显微镜, 获得缓冲带试样的微观形貌特征。结果表明: 在烧蚀过程中, 干燥缓冲带试样的交流体积电阻率随时间逐渐升高, 并出现短暂的电流激增和电压骤降的现象; 吸水缓冲带试样的交流体积电阻率会出现随时间逐渐降低的过程, 并且吸水后缓冲带试样的交流体积电阻率相比干燥时有所下降; 当压强从 1.09 kPa 增加至 5.45 kPa 时, 干燥与吸水缓冲带试样的交流体积电阻率均逐渐降低。结合缓冲带烧蚀模拟实验结果以及微观形貌特征可得出压强和吸水对缓冲带动态导电特性的影响机理。

关键词: 高压交联聚乙烯(XLPE)电缆; 阻水缓冲带; 烧蚀故障; 交流体积电阻率; 微观形貌; 导电机理

中图分类号: TM215.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2022)06-0163-09

0 引言

高压电缆缓冲层的烧蚀故障是近年来电力系统中频繁出现的电缆故障类型, 因此受到了广泛关注^[1-6]。电缆缓冲层烧蚀故障主要表现为在铝护套、缓冲带以及绝缘外屏蔽表面出现白色物质, 同时在缓冲带表面出现烧蚀孔洞, 在铝护套内表面出现腐蚀痕迹。现场发现的电缆缓冲层烧蚀故障通常出现在皱纹铝护套波谷与缓冲层紧密接触处且在缓冲带吸水的情况下, 因此压强和吸水是导致电缆缓冲层发生烧蚀故障的重要因素。为此, 研究电缆缓冲层烧蚀故障机理, 获得压强和吸水对缓冲层烧蚀故障过程的影响机制, 对于预防电缆缓冲层烧蚀故障、提升高压电缆可靠性以及维护电力系统安全稳定运行具有重要的意义。

国内外研究人员已对缓冲层的烧蚀机理开展了大量的研究与分析工作。文献[7]分析了烧蚀故障电缆内部缓冲层及皱纹铝护套的烧蚀特征形貌, 认为缓冲层与皱纹铝护套之间的不良接触以及金属护套上因较大感应电压所产生的放电, 是造成高压交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)绝缘电缆护层烧蚀的原因。文献[8]测量了电缆中铝护套与外屏蔽间不同位置的电阻, 结果表明烧蚀生成的白色粉末具有高阻特性, 导致缓冲层与铝护套

之间电气接触不良, 产生放电造成电缆故障失效。文献[9]对故障电缆进行了局部放电检测及缓冲层电流分布仿真, 发现在正常运行电压下, 电缆本体产生的泄露电流可在一定程度上灼伤阻水缓冲带(文中简称缓冲带), 缓冲层间隙的存在会导致缓冲带上部分区域电流集中, 产生灼伤; 而过电压会使泄露电流增大, 加剧缓冲带灼伤。文献[10]研究发现缓冲带受潮是白色物质生成的必要条件, 而缓冲层与铝护套接触紧密或施加电流会加快白色物质的生成速度; 文献[11]研究了烧蚀产物白色物质的形成机理; 文献[12]研究了缓冲带的交直流电阻的影响因素, 发现交直流电阻随温度、压力增大而减小, 且缓冲带在交流电压作用下不断积聚热量, 导致交流电阻有效值持续降低, 最终导致试样燃烧。可以发现, 目前对于缓冲层烧蚀机理的研究主要针对烧蚀故障起因, 而对缓冲层烧蚀过程的研究仍有所不足, 特别是在压强和吸水对缓冲层烧蚀过程的影响机制方面, 因而电缆缓冲层烧蚀故障产生的机理仍不够明确。

文中分别对干燥及吸水后的缓冲带进行烧蚀模拟实验, 获得了加压过程中缓冲带试样的电流密度、电压以及交流体积电阻率的动态变化过程, 并分析了压强和吸水对缓冲带导电性能的影响规律。同时, 为获得压强和吸水对缓冲带烧蚀过程的影响机制, 文中观察了吸水前后缓冲带的微观形貌特征, 并结合缓冲带动态导电特性, 解释了压强和吸水对缓冲带导电特性的影响。

收稿日期: 2022-06-03; 修回日期: 2022-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2066204)

1 实验方法

1.1 试样的预处理

文中采用型号为 BHZD200、厚度为 2 mm 的缓冲带试样。将缓冲带裁剪为直径 50 mm 的圆片,置于 50 °C 烘箱内烘 12 h 以充分去除水分,得到干燥缓冲带试样。利用针管注射器将 1 mL 自来水均匀喷洒在干燥缓冲带试样表面,得到吸水缓冲带试样。将电工铝 1060 加工成 30 mm×30 mm×2 mm 的正方形薄片,并用砂纸将上下表面打磨光滑。

1.2 缓冲带在烧蚀过程中的动态导电特性测试

参考机械行业标准 JB/T 10259—2014,对缓冲带的动态导电特性进行测试。将预处理后的缓冲带试样与电工铝薄片叠放于柱板铜电极中,使电工铝薄片位于缓冲带上方,且缓冲带试样的蓬松棉一侧与电工铝薄片相接触,以模拟缓冲带在实际电缆中与铝护套相接触的情况。通过砝码来调节施加在缓冲带试样表面的压强大小。缓冲带承受的重量分别设置为 100 g、300 g 以及 500 g,按铝片面积换算,得到缓冲带承受的压强分别为 1.09 kPa、3.27 kPa 以及 5.45 kPa。

实验外围电路如图 1 所示,保护电阻的阻值为 100 Ω。调节调压器,使电极两端的电压达到 5 V,并保持调压器输出电压不变,即电压表 V1 示数不变,随后开始对缓冲带试样进行模拟烧蚀。由电流表 A1 和电压表 V2 分别实时记录烧蚀过程中缓冲带试样的电流密度和电压的动态变化,采样时间间隔为 5 s。每组实验测试时长为 6 h,每组实验重复至少 3 次,以确保实验规律的可靠性。

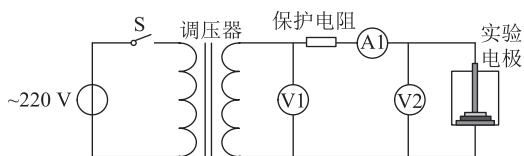


图 1 外围电路示意

Fig.1 Schematic diagram of peripheral circuit

2 缓冲带试样动态导电特性

2.1 电流密度和电压的动态变化规律

2.1.1 干燥缓冲带试样

不同压强下干燥缓冲带试样的电流密度和电压的动态变化过程如图 2 所示。由图 2 可以看出,随着时间的增加,不同压强下干燥缓冲带的电流密度均先逐渐下降后趋于平稳。此外,还可观察到短暂的电流激增同时电压骤降的现象,如图 2 中放大部分所示。

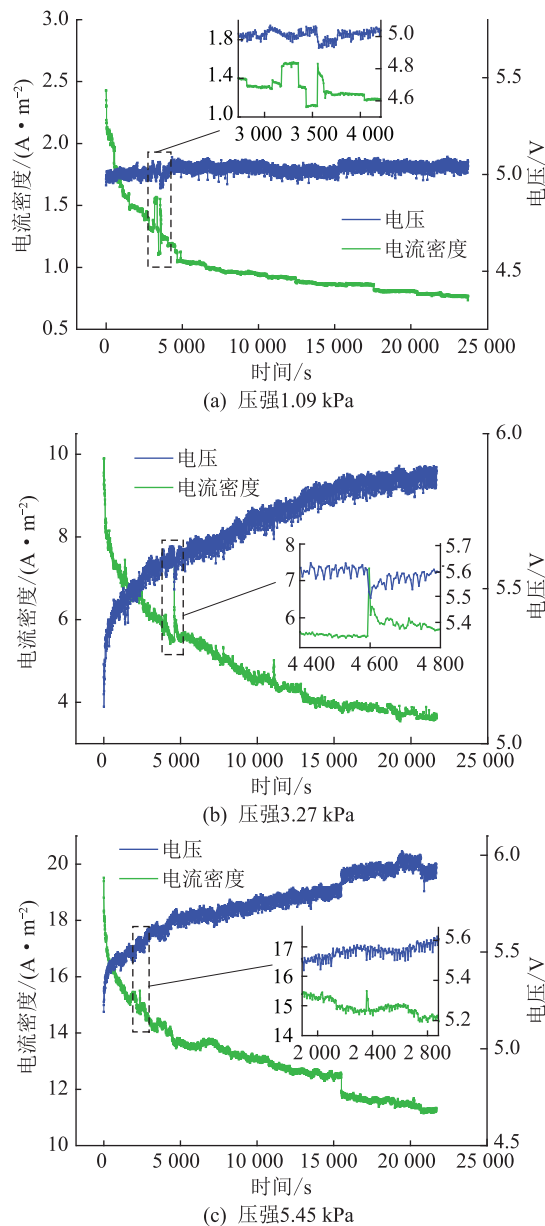


图 2 不同压强下干燥缓冲带试样的
电流密度和电压的动态变化

Fig.2 Dynamic variations of current density and voltage of dry buffer tape samples under different pressures

将电流密度激增峰的峰值与激增前电流密度大小的比值定义为电流密度激增程度。当压强分别为 1.09 kPa、3.27 kPa 以及 5.45 kPa 时,干燥缓冲带试样的电流密度激增程度分别约为 40%、33%、4%,可见随着压强的增加,电流密度激增程度急剧降低。

对于干燥缓冲带试样的电压动态变化规律,当压强为 1.09 kPa 时,干燥缓冲带的电压基本保持稳定;当压强增加到 3.27 kPa 以及 5.45 kPa 时,干燥缓冲带的电压会随时间逐渐升高,干燥缓冲带在线路中的分压增加、保护电阻的分压减小。结合干燥缓冲带试样的电流密度动态变化规律可知,干燥缓

冲带在施加电压的过程中,电阻会逐渐增大。

2.1.2 吸水缓冲带试样

不同压强下吸水缓冲带试样的电流密度和电压的动态变化过程如图 3 所示。

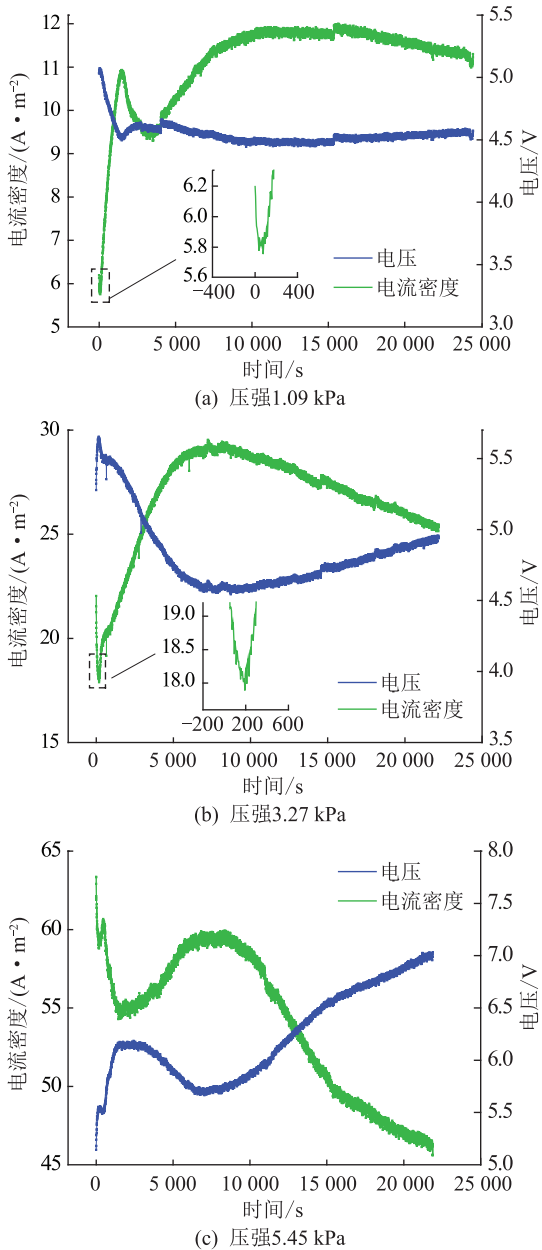


图 3 不同压强下吸水缓冲带试样的电流密度和电压的动态变化

Fig.3 Dynamic variations of current density and voltage of wet buffer tape samples under different pressures

吸水缓冲带试样的电流密度存在随时间逐渐增加的过程。吸水缓冲带试样电流密度的上升持续时间与压强有关,从图 3 可以看出,随着压强增加,电流密度上升的持续时间逐渐缩短。此外,吸水缓冲带试样在烧蚀过程中没有出现电流密度激增以及电压骤降的现象。对于吸水缓冲带试样的电压动态变化规律,在不同压强下,吸水缓冲带的电

压均存在随时间逐渐降低的过程。结合吸水缓冲带试样的电流密度动态变化规律可知,吸水缓冲带在烧蚀过程中,电阻会存在随时间逐渐降低的过程。

加压结束后,将吸水缓冲带试样从电极中取出,可观察到铝片与缓冲带接触的区域出现腐蚀,且下电极铜表面也出现了腐蚀发黑的情况,表明吸水缓冲带在加压过程中与铝和铜发生了化学腐蚀。

2.2 交流体积电阻率的动态变化规律

对不同压强下干燥与吸水后缓冲带在烧蚀前后的厚度进行测量,结果表明,不同压强下干燥与吸水 1 mL 缓冲带试样在烧蚀前后厚度均约为 2 mm,因此忽略烧蚀过程中缓冲带试样厚度的变化。根据干燥缓冲带试样电流密度和电压的动态变化规律,计算得到干燥缓冲带试样的交流体积电阻率随时间的变化过程,如图 4 所示。

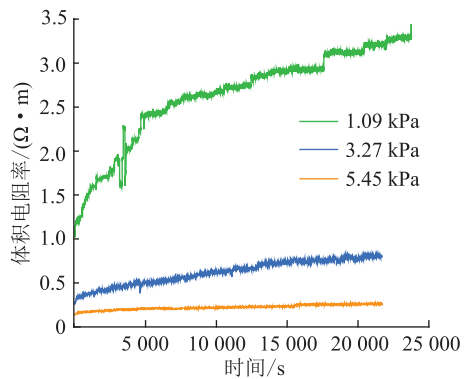


图 4 不同压强下干燥缓冲带试样的交流体积电阻率的动态变化

Fig.4 Dynamic variations of AC volume resistivity of dry buffer tape samples under different pressures

从图 4 可以看出,干燥缓冲带的交流体积电阻率在烧蚀过程中随时间逐渐增加,且干燥缓冲带的交流体积电阻率大小与其承受的压强有关,压强越大,交流体积电阻率越小。此外,烧蚀过程中干燥缓冲带交流体积电阻率的增大幅度也与其承受的压强有关。当压强分别为 1.09 kPa、3.27 kPa 以及 5.45 kPa 时,烧蚀 6 h 后干燥缓冲带的交流体积电阻率相比于初始时刻分别增加了 216%、208% 以及 100%。因此,随压强的增加,烧蚀后干燥缓冲带交流体积电阻率的增大幅度会逐渐降低。

依照相同方法计算烧蚀过程中吸水缓冲带试样的交流体积电阻率的动态变化,如图 5 所示。可以看出,吸水缓冲带的交流体积电阻率也与压强有关,压强越大,交流体积电阻率越小,与干燥缓冲带的情况类似。此外在烧蚀过程中,吸水缓冲带的交流体积电阻率随时间先小幅度增加,随后逐渐降低,且在某一时刻又转变为随时间逐渐增加,转变

的时刻如图 5(b) 所示。可以看出,当压强分别为 1.09 kPa、3.27 kPa 以及 5.45 kPa 时,交流体积电阻率下降的持续时间分别在 9 000 s、7 000 s 以及 6 500 s 附近。因此随着压强增加,交流体积电阻率下降的持续时间逐渐缩短。

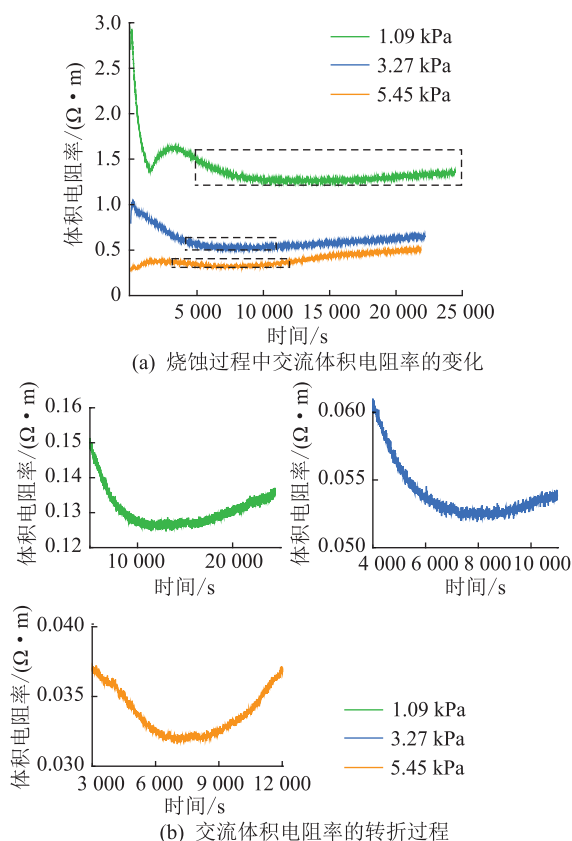


图 5 不同压强下吸水缓冲带试样的交流体积电阻率的动态变化

Fig.5 Dynamic variations of AC volume resistivity of wet buffer tape samples under different pressures

对比干燥与吸水缓冲带在烧蚀过程中交流体积电阻率随时间的变化,如图 6 所示。可以看出相比于干燥缓冲带,缓冲带在吸水 1 mL 后交流体积电阻率有所降低,且其承受的压强越大,交流体积电阻率降低的幅度越小。

3 缓冲带试样的微观形貌特征

缓冲带由蓬松棉层、阻水粉层以及无纺布层 3 层结构组成,其中蓬松棉层与无纺布层位于两侧,中间为阻水粉层^[13-14]。蓬松棉与无纺布的基材均由聚酯短纤维编织而成,并通过浸渍导电水性胶液获得导电特性;阻水粉通过导电粘合剂粘接于导电蓬松棉与导电无纺布之间。

为揭示缓冲带试样动态导电过程,需要分别对干燥与吸水后的缓冲带试样的蓬松棉、无纺布以及阻水粉的内部微观结构进行分析,以构建缓冲带的

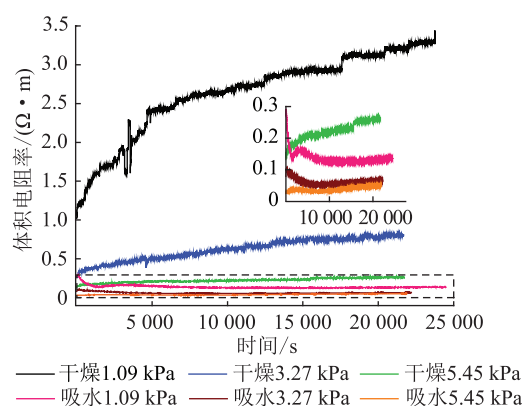


图 6 不同压强下干燥与吸水缓冲带试样交流体积电阻率的对比

Fig.6 Comparison of AC volume resistivity of dry and wet buffer tape samples under different pressures

动态导电模型。采用扫描电镜-能谱联用仪对试样的微观形貌特征以及元素组成进行分析。干燥缓冲带试样的微观形貌如图 7 所示。

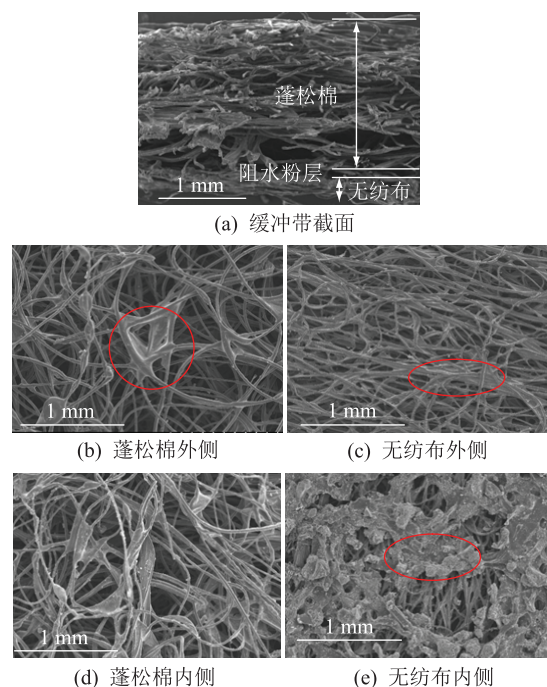


图 7 干燥缓冲带试样的微观形貌

Fig.7 Micromorphology of dry buffer tape specimens

从缓冲带截面图可以看出,蓬松棉层厚度较大,导电纤维网络的空隙较大,结构较松散;无纺布层厚度较小,导电纤维网络的空隙较小,结构更紧实。另外,在蓬松棉与无纺布中均能观察到由导电水性胶液粘接形成的面状导电聚酯纤维簇,如图 7(b)、7(c) 中红圈所示。从中间揭开缓冲带,可以在无纺布内侧观察到由导电粘合剂粘接的阻水粉层,如图 7(e) 中红圈所示,而在蓬松棉内侧仅观察到离散分布的阻水粉,表明阻水粉与蓬松

棉之间的粘接强度要弱于无纺布。此外,图 7(e)中部分区域阻水粉缺失是因为揭开缓冲带的过程中阻水粉被剥离。

吸水缓冲带的微观形貌如图 8 所示,可以看出,缓冲带吸水后,无纺布内侧的阻水粉大量膨胀,形成一层连续分布的阻水粉层,伴随少量孔洞,如图 8(d)中红圈所示。另外,缓冲带吸水后,在无纺布和蓬松棉的外侧未观察到阻水粉析出,聚酯纤维的形貌特征与干燥时相比变化不大。

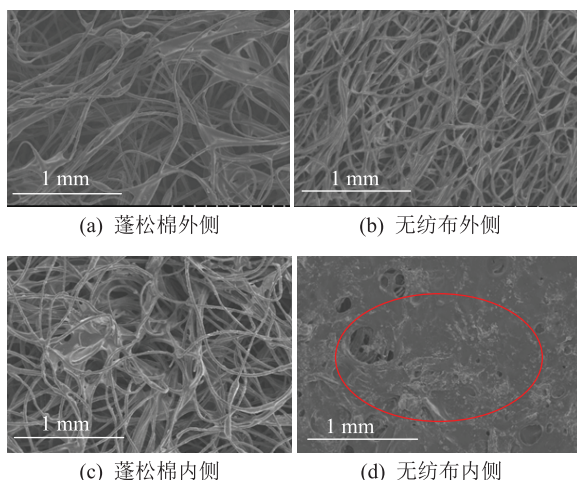


图 8 吸水缓冲带试样的微观形貌

Fig.8 Micromorphology of wet buffer tape specimens

吸水缓冲带试样在 3.27 kPa 压强下烧蚀后,缓冲带蓬松棉外表面以及铝片表面的微观形貌如图 9 所示。可以看出,烧蚀后会产生大量白色物质附着在蓬松棉以及铝片表面,如图 9 中红框所示。

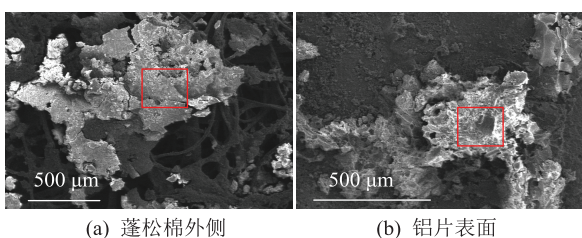


图 9 烧蚀后吸水缓冲带试样蓬松棉表面以及铝片表面的微观形貌

Fig.9 Micromorphology of fluffy cotton surface of wet buffer tape specimens and aluminum sheet surface after the ablation

采用能谱分析对缓冲带蓬松棉表面和铝片表面的元素成分进行分析,结果如表 1 所示,其中“√”表示存在该元素。可以发现,烧蚀前干燥与吸水缓冲带蓬松棉表面仅含有碳元素(C)和氧元素(O)。而吸水缓冲带试样烧蚀后,烧蚀产生的白色物质中额外出现了钠元素(Na)和铝元素(Al),烧蚀后铝片表面的白色物质中也出现了钠元素。

表 1 不同缓冲带试样蓬松棉表面的元素成分

Table 1 Elemental compositions of fluffy cotton surfaces of different buffer tape specimens

能谱扫描区域	C	O	Na	Al
干燥缓冲带蓬松棉外侧	√	√		
吸水缓冲带蓬松棉外侧	√	√		
烧蚀后吸水缓冲带蓬松棉外侧白色物质	√	√	√	√
烧蚀后铝片表面白色物质	√	√	√	√

4 缓冲带试样的动态导电机理

结合缓冲带试样的微观形貌特征以及动态导电特性,可以对缓冲带在干燥与吸水状态下的动态导电特性及差异进行分析,并解释压强和吸水对缓冲带导电性能的影响机理。

4.1 干燥缓冲带的动态导电机理

根据缓冲带的微观形貌特征,可得干燥缓冲带的微观结构示意图,如图 10 所示。缓冲带两侧分别由稀疏程度不同的半导体聚酯纤维网络构成,其中蓬松棉的半导体聚酯纤维网络较稀疏,而无纺布的半导体聚酯纤维网络较致密。蓬松棉与无纺布之间存在着微观上不连续分布的阻水粉颗粒,阻水粉表面包覆半导体粘合剂,构成蓬松棉与无纺布之间的导电通路。此外,在部分阻水粉颗粒间的微观区域内,蓬松棉与无纺布之间也可能存在通过半导体聚酯纤维直接搭接而成的导电通路。

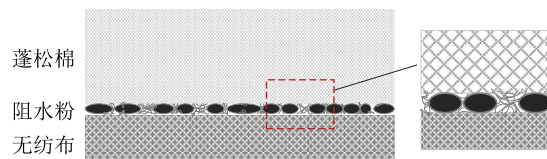


图 10 干燥缓冲带的微观结构

Fig.10 Microstructure of dry buffer tape

当干燥缓冲带通过电流时,在阻水粉层中,一部分电流会沿阻水粉表面的半导体粘合剂传导,另一部分会通过蓬松棉与无纺布之间搭接的半导体聚酯纤维进行传导。因此推测这种不均匀的导电路径会导致电流密度在缓冲带中不均匀。

由于不均匀的电流密度,缓冲带阻水粉层中的某些导电路径可能会产生局部电流集中,造成局部发热严重,半导体聚酯纤维丝会因过热而收缩或熔断^[15],导致缓冲带内的有效导电路径数量逐渐减少,缓冲带中通过的电流密度逐渐降低,其表现为干燥缓冲带试样的交流体积电阻率逐渐增大。半导体聚酯纤维热收缩或熔断会导致出现图 2 中短暂的电流激增以及电压骤降现象,该过程如图 11 所示。

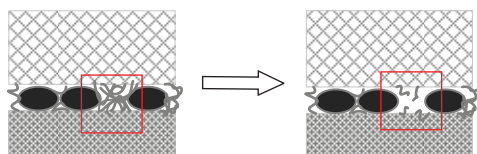


图 11 干燥缓冲带中导电纤维熔断
Fig.11 Fusing of conductive fibers in dry buffer tape

当干燥缓冲带压强增加时,蓬松棉与无纺布中导电聚酯纤维网络的空隙减小,可能会使导电通路的有效面积增加,导致缓冲带的交流体积电阻率减小。同时随着缓冲带中的导电聚酯纤维之间有效接触面积增大,缓冲带中流过的电流可能会更加均匀,不易产生由电流集中造成导电纤维丝过热熔断使有效导电路径减少的现象,这使得烧蚀过程中交流体积电阻率的增大幅度随压强增加而降低。另外,蓬松棉与无纺布中存在大量空气气隙,而空气的热阻系数要比缓冲带中的导电聚酯纤维高约一个数量级,因此缓冲带的热阻系数主要取决于纤维层中气隙的状态与含量^[16]。由此推测随着压强增加,干燥缓冲带中的气隙逐渐减少,缓冲带的热阻逐渐降低,因电流分布不均而产生的热量集中得到改善,使得导电纤维丝过热熔断现象逐渐减少,电流密度激增程度逐渐减小。

4.2 吸水缓冲带的动态导电机理

当缓冲带吸水后,中间阻水粉层吸水膨胀,形成一层连续的阻水粉吸水凝胶层,导致缓冲带试样的厚度增加。吸水后缓冲带的微观结构见图 12。

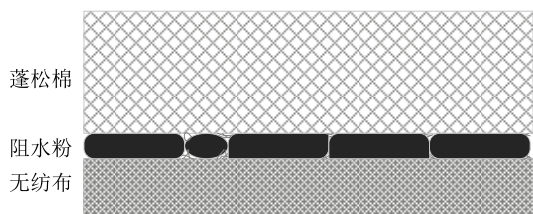


图 12 吸水缓冲带的微观结构
Fig.12 Microstructure of wet buffer tape

缓冲带中的阻水粉通常采用交联型聚丙烯酸钠树脂,其化学结构式以及吸水前后交联网络结构变化如图 13 所示。聚丙烯酸钠聚合物网络中的羧酸钠侧基为亲水基团,遇水后会电离形成羧酸根离子(COO⁻)和钠离子(Na⁺),其中 Na⁺可自由迁移,而 COO⁻为聚合物主链网络的一部分,不能自由移动^[17-18]。吸水后聚丙烯酸钠的主链网络骨架会由于 COO⁻之间的静电力排斥作用而得到伸展,体积膨胀,使得大量的水封闭在聚丙烯酸钠的三维网络中,即使受到挤压水也很难从三维网络中溢出,从

而起到阻水的作用^[19-21]。聚丙烯酸钠吸水前后的变化如图 13 (b)所示。另外,由于聚丙烯酸钠的加工过程是先由聚丙烯酸单体聚合后得到聚丙烯酸,再通过添加氢氧化钠调节反应液的 pH 值至 6~9 后得到,因此阻水粉在吸水后还会产生游离的氢氧根离子(OH⁻)。

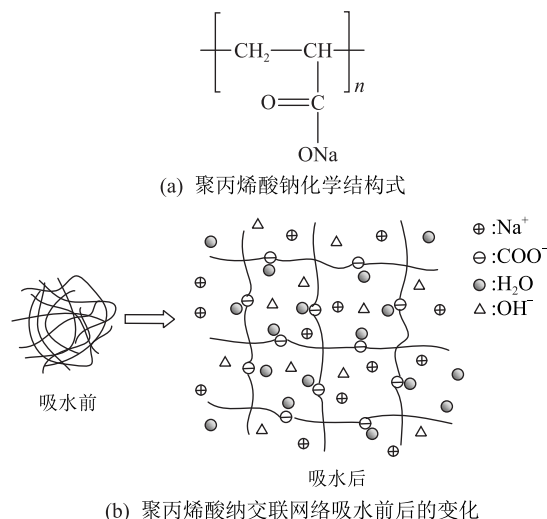
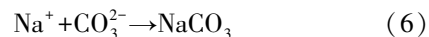
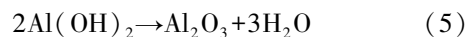
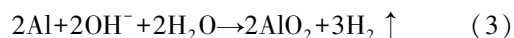
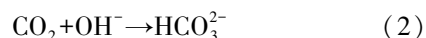
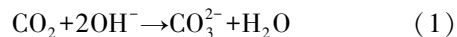


图 13 聚丙烯酸钠化学结构式及其交联网络
Fig.13 Chemical structure and cross-linked network of poly sodium acrylate

在吸水缓冲带上施加电压后,阻水粉中产生了大量游离的 Na⁺和 OH⁻,可能会导致吸水后缓冲带中的载流子数量增加,使得吸水缓冲带试样的电流密度相比于干燥缓冲带有所增加。在电压作用下,阻水粉吸水形成的 Na⁺和 OH⁻源源不断地从缓冲带中间向缓冲带两侧迁移,起到载流子的作用,导致电流密度随时间不断增大,交流体积电阻率不断降低。

虽然阻水粉吸水后得到了大量游离的 Na⁺和 OH⁻,并在电压的作用下作为载流子向缓冲带两端迁移,但 Na⁺和 OH⁻的数量仍有限。在一定电压下作用一段时间后,Na⁺和 OH⁻会大部分迁移到缓冲带表面,并参与到缓冲带与铝片之间的化学反应过程中^[8-9,22-25],如式(1)一式(7)所示。



其中,碳酸钠、碳酸氢钠、氧化铝均为白色粉末,沉积在缓冲带与铝片表面。在 Na⁺和 OH⁻被缓

冲带表面与铝片之间不断发生的化学反应大量消耗后,中间阻水粉层可能无法继续提供更多的可自由迁移的 Na^+ ,所以在此之后吸水缓冲带的导电过程可能变回到与干燥缓冲带相类似的导电过程,导致交流体积电阻率又随时间不断增大。吸水缓冲带的动态导电过程如图 14 所示。

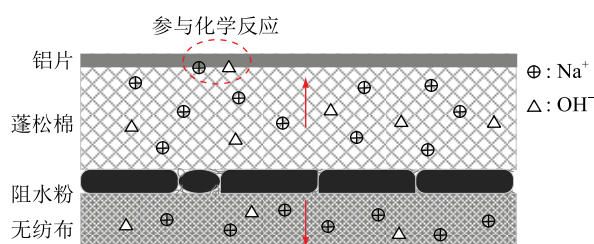


图 14 吸水缓冲带中钠离子和氢氧根离子的迁移

Fig.14 The migration of sodium ions and hydroxyl ions in wet buffer tape

因此推测,当缓冲带中存在大量由于阻水粉吸水而得到的游离的 Na^+ 和 OH^- 时,缓冲带的电流密度随时间逐渐增大,交流体积电阻率随时间逐渐降低;当大部分游离的 Na^+ 和 OH^- 在缓冲带与铝片之间的化学反应中被消耗完毕后,缓冲带中不再有额外的载流子,所以此时吸水缓冲带的导电方式与干燥缓冲带类似。但吸水缓冲带中的阻水粉由于吸水膨胀而分布更加均匀,改善了电流集中的情况,同时由于聚丙烯酸钠阻水粉中存储了大量水分,缓解了缓冲带的局部电流集中,因此难以出现电流激增现象。

与干燥缓冲带的情况类似,当吸水后的缓冲带压强增加时,导电聚酯纤维网络的有效接触面积增加,使得导电通路的有效面积增加,导致吸水缓冲带的交流体积电阻率降低。而吸水后缓冲带的交流体积电阻率随压强变化的幅度较小,原因可能为吸水对交流体积电阻率的影响程度要远大于压强变化的作用。

另外,吸水缓冲带交流体积电阻率降低的时长随压强增加而缩短。其原因推测为当压强增加后,吸水缓冲带的厚度降低, Na^+ 和 OH^- 的迁移距离缩短,能更容易迁移到缓冲带和铝片之间参与化学反应,从而 Na^+ 和 OH^- 的消耗速度加快,导致电阻率降低的时长缩短。

5 结论

文中对干燥与吸水缓冲带在烧蚀过程中电流密度、电压以及交流体积电阻率的动态变化规律进行了研究,给出了缓冲带在吸水前后的微观形貌特征,由此解释了缓冲带试样的动态导电机理。主要

结论如下:

(1) 干燥缓冲带在烧蚀过程中,交流体积电阻率随时间逐渐增大,并存在短暂的电流激增同时电压骤降现象;吸水缓冲带试样在烧蚀过程中,交流体积电阻率随时间先逐渐降低,后逐渐升高。随着压强的增加,缓冲带的交流体积电阻率降低;吸水后缓冲带的交流体积电阻率相比于干燥时有所下降。

(2) 干燥缓冲带阻水粉层的导电路径分布不均可能导致其通过的电流密度不均匀,容易引起局部过热,导致缓冲带的导电聚酯纤维丝熔断,造成有效导电路径减少,交流体积电阻率在烧蚀过程中逐渐增大。吸水缓冲带试样中,阻水粉吸水电离出的大量可自由迁移的 Na^+ 和 OH^- 可能会作为载流子参与导电过程,导致烧蚀过程中电流密度随时间逐渐增大,交流体积电阻率逐渐降低;推测得出当 Na^+ 和 OH^- 在缓冲带与铝片之间的化学反应中被消耗完毕后,不会有额外的载流子参与导电过程,吸水缓冲带的导电过程恢复到与干燥缓冲带相类似的情况,导致交流体积电阻率在到达最小值后随时间逐渐增大。

(3) 缓冲带承受的压强可能会改变其导电聚酯纤维之间的接触面积,从而调节缓冲带的有效导电面积。因此对于干燥和吸水的缓冲带试样,当压强增加时,其有效导电面积增加,交流体积电阻率均会降低。

参考文献:

- [1] 张静,王伟,徐明忠,等. 高压电缆缓冲层轴向沿面烧蚀故障机理分析[J]. 电力工程技术,2020,39(3):180-184.
ZHANG Jing, WANG Wei, XU Mingzhong, et al. Analysis of axial ablation failure mechanism of buffer layer of high voltage power cable [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020,39(3):180-184.
- [2] 吴科,邓旭东,别桦,等. 高压电力电缆绝缘屏蔽烧蚀机理分析及应对措施[J]. 绝缘材料,2020,53(2):97-101.
WU Ke, DENG Xudong, BIE Hua, et al. Ablation mechanism analysis and countermeasures of insulation shielding of high voltage power cable [J]. Insulating Materials, 2020, 53(2):97-101.
- [3] 李陈莹,李鸿泽,陈杰,等. 高压 XLPE 电力电缆缓冲层放电问题分析[J]. 电力工程技术,2018,37(2):61-66.
LI Chenying, LI Hongze, CHEN Jie, et al. Analysis of high voltage XLPE power cable buffer layer discharge problem [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018,37(2):61-66.
- [4] SU C Q. Failure analysis of three 230 kV XLPE cables [C]// 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA). Sao Paulo, Brazil. IEEE, 2010:22-25.

- [5] SONG P X, MENG Z Z, LI X, et al. A case study on ablation breakdown of high voltage cable buffer layer[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Beijing, China. IEEE, 2020, 1-4.
- [6] 孟峥峥,李旭,于洋,等. 高压XLPE 电缆缓冲层故障研究现状综述[J]. 中国电力,2021,54(4):33-41,55.
MENG Zhengzheng, LI Xu, YU Yang, et al. Review on the research status of the high voltage XLPE cable buffer layer failure [J]. Electric Power, 2021, 54(4): 33-41, 55.
- [7] 周松霖,刘若溪,姜磊,等. 高压XLPE 绝缘电力电缆护层烧蚀机理分析[J]. 高压电器,2020,56(12):171-176.
ZHOU Songlin, LIU Ruoxi, JIANG Lei, et al. Ablation mechanism analysis on metal sheath of high voltage XLPE insulated power cable[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 171-176.
- [8] CHEN Y, HUI B J, CHENG Y T, et al. Failure investigation of buffer layers in high-voltage XLPE cables[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 113: 104546.
- [9] 严有祥,张玮玮,王蕾,等. 高压XLPE 电缆缓冲层灼伤问题仿真及试验研究[C]//福建省电机工程学会 2019 年学术年会获奖论文集. 福建:海峡出版发行集团,2020:318-328.
YAN Youxiang, ZHANG Weiwei, WANG Lei, et al. Simulation and experimental study on ablation of buffer layer in high voltage XLPE cables[C]//Collection of Award-winning Papers of 2019 Academic Annual Meeting of Fujian Institute of Electrical Engineering. Fujian: The straits publishing & distributing group, 2020: 318-328.
- [10] 欧阳本红,李文杰,刘英,等. 高压XLPE 电缆阻水缓冲层烧蚀机理[J]. 高电压技术,2021,47(9):3153-3162.
OUYANG Benhong, LI Wenjie, LIU Ying, et al. Ablation mechanism of water-blocking buffer layer in HV XLPE cables [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3153-3162.
- [11] LIU Y, LIAN R, CHEN J W, et al. The formation mechanism of white substances on water-blocking buffer layer of HV XLPE cables [C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). Beijing, China. IEEE, 2020: 1-4.
- [12] 黄宇,尹毅,吴长顺. 高压电缆阻水缓冲层电性能研究[J]. 电线电缆,2018(6):6-9,19.
HUANG Yu, YIN Yi, WU Changshun. Study on electrical properties of water blocking buffer layer in high voltage cables [J]. Wire & Cable, 2018(6): 6-9, 19.
- [13] LI Z J, LI X, FANG S C, et al. Effects of the environmental factors on electrical properties of high voltage cable buffer layer [C]//2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD). Valencia, Spain. IEEE, 2020: 546-549.
- [14] 邓声华,江福章,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.
DENG Shenghua, JIANG Fuzhang, LIU Heping, et al. Research on materials and structural characteristics of buffer layers for high voltage cable [J]. Wire & Cable, 2019(2): 19-27.
- [15] LIU Y, CHEN J M, ZHANG H Y. Study on the current concentration and local heating of the buffer layer in HV XLPE cables [C]//2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Chongqing, China. IEEE, 2021: 1-4.
- [16] 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.
ZHAO Jiankang, FAN Youbing. Study of the design and process of the buffer in HV power cables [J]. Wire & Cable, 2010(3): 17-21.
- [17] 林润雄,姜斌,黄毓礼. 高吸水性树脂吸水机理的探讨[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),1998,25(3):22-27.
LIN Runxiong, JIANG Bin, HUANG Yuli. Study on water absorption mechanism of absorbent resin [J], Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 1998, 25(3): 22-27.
- [18] 陈军武,赵耀明. 反相悬浮聚合法制备高吸水树脂及其性能研究[J]. 高分子材料科学与工程,2000,16(1):67-69,73.
CHEN Junwu, ZHAO Yaoming. Preparation and characterization of superabsorbent by reversed phase suspension polymerization [J]. Polymeric Materials Science & Engineering, 2000, 16(1): 67-69, 73.
- [19] 陈振斌,马应霞,张安杰,等. 聚丙烯酸钠高吸水性树脂的改性研究进展[J]. 应用化工,2009,38(11):1656-1661.
CHEN Zhenbin, MA Yingxia, ZHANG Anjie, et al. Advanced development of modification of superabsorbent polymer based on sodium polyacrylate [J]. Applied Chemical Industry, 2009, 38(11): 1656-1661.
- [20] 贾振宇,崔英德,黎新明,等. 聚丙烯酸钠高吸水性树脂的改性研究进展[J]. 化工进展,2004,23(5):468-471.
JIA Zhenyu, CUI Yingde, LI Xinming, et al. Progress in modification of poly-AA-Na super absorbent polymer [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2004, 23(5): 468-471.
- [21] 韦文珍,张玲,李炳奇. 高分子吸水树脂的合成与应用[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2000,4(4):338-343.
WEI Wengzhen, ZHANG Ling, LI Bingqi. The Synthetic and use of macromolecule resin of absorbing moisture [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2000, 4(4): 338-343.
- [22] FRENCH W H. Alternating current corrosion of aluminum [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1973, PAS-92(6):2053-2062.
- [23] CHEN Y D, ZHOU K, KONG J M, et al. Hydrogen evolution and electromigration in the corrosion of aluminium metal sheath inside high-voltage cables [J]. High Voltage, 2022, 7(2): 260-268.
- [24] 周凯,赵琦,李原,等. 基于分阶段产气的高压电缆阻水缓冲层状态评估[J/OL]. 高电压技术:1-9[2022-06-03]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220306>.
ZHOU Kai, ZHAO Qi, LI Yuan, et al. Evaluation technology of water-blocking buffer layer of high voltage cable based on stages classification of gases evolution [J/OL]. High Voltage

Engineering; 1-9 [2022-06-03]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220306>.

- [25] 刘英,陈佳美. 高压 XLPE 电缆阻水缓冲层电-热场分析及模拟烧蚀试验研究[J]. 中国电机工程学报,2022,42(4): 1260-1271.

LIU Ying, CHEN Jiamei. Electro-thermal field analysis and simulated ablation experiments for the water-blocking buffer layer in high voltage XLPE cable [J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(4):1260-1271.

作者简介:



门业堃

门业堃(1990),男,硕士,工程师,从事高电压与绝缘技术相关工作(E-mail:yekun.men@foxmail.com);

张竞成(1984),男,硕士,高级工程师,从事电缆建设和运维工作;

郭卫(1984),男,博士,高级工程师,从事高电压与绝缘技术相关工作。

Dynamic conductive property and mechanism of buffer tape in HV XLPE cables

MEN Yekun¹, ZHANG Jingcheng², GUO Wei¹, GAO Jian³, LI Jianying³, YU Fei⁴

(1. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China;

2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China;

3. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

4. Shenyang Tianrong Cable Material Co., Ltd., Shenyang 110027, China)

Abstract: Ablation of the buffer layer in high voltage cross-linked polyethylene (XLPE) cables has been the attractive type of cable failure. The ablation of buffer layer commonly takes place under the pressure and moisture. Therefore, it is important to investigate the effect mechanism of pressure and moisture on the ablation of buffer layer. In this study, the simulated experiments of dry and wet water-blocking buffer tape under different pressures are carried out, whereby dynamic variations of current density, voltage and alternating current (AC) volume resistivity in the processes of ablation are obtained. The micromorphology of buffer tape specimens is obtained through the scanning electronic spectroscopy. It is shown that the AC volume resistivity of dry buffer tape samples gradually increases with time in the process of ablation, accompanied with the transient surge of current and the plunge of voltage. While the AC volume resistivity of wet buffer tape samples gradually decreases with time. Moreover, a decrease of AC volume resistivity occurs to the buffer tape samples after the water absorption. With the increase of pressure from 1.09 kPa to 5.45 kPa, a decrease of volume resistivity occurs to both the dry and wet buffer tape samples. Combined with the results of stimulated ablation experiments and the micromorphology of buffer tape, the effect mechanisms of the pressure and moisture on the conductive property of buffer tape are explained.

Keywords: high voltage cross-linked polyethylene (XLPE) cable; water-blocking buffer tape; ablation failure; alternating current volume resistivity; micromorphology; conductive mechanism

(编辑 陆海霞)