

DOI: 10.7652/xjtuxb202002013

液氮环境下电老化对聚丙烯层压纸 交流击穿及陷阱分布特性的影响

李红雷¹, 付松林², 严智民², 李建英²

(1. 国家电网上海市电力公司电力科学研究院, 200437, 上海;
2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了研究高温超导电缆绝缘材料聚丙烯层压纸(PPLP)在实际服役过程中的老化规律及机理,对 PPLP 绝缘材料进行了不同程度的电老化,通过交流击穿及等温表面电位衰减研究了电老化对 PPLP 绝缘材料击穿特性及陷阱分布特性的影响,并结合红外光谱、显微形貌观测和热重实验分析其老化机理。实验结果表明:随着电老化程度的增大,PPLP 绝缘材料的交流击穿场强由 113.3 kV/mm 降低至 92.3 kV/mm,浅陷阱密度逐渐增大,深陷阱密度逐渐减小;PPLP 外层绝缘纸结构趋于松散,部分纤维素断裂,表面出现大量孔隙,绝缘纸内部氢键及糖苷键对应的红外吸收峰强度降低;同时,绝缘纸的最快热失重温度降低,而中层聚丙烯的热失重过程未发生明显变化,说明在老化过程中 PPLP 绝缘性能下降的主要原因在于外层绝缘纸的劣化。分析认为:纤维素分子主链上的糖苷键以及分子间的氢键在高能电子的撞击下发生断裂,分子间作用力减弱,结构致密性降低;绝缘纸内部自由体积增大,纤维素分子链段对电荷的束缚能力减弱,电荷更容易在分子链间进行迁移,进而导致 PPLP 绝缘深陷阱密度和交流击穿场强降低。

关键词: 电老化;聚丙烯层压纸;陷阱;击穿;纤维素

中图分类号: TM215.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)02-0103-08

Effects of Electrical Aging on AC Breakdown and Trap Distribution Characteristics of Polypropylene Laminated Papers in Liquid Nitrogen

LI Honglei¹, FU Songlin², YAN Zhimin², LI Jianying²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200437, China;
2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Different degrees of electrical aging test for PPLP insulation is carried out to study the aging mechanisms of polypropylene laminated paper (PPLP), which is the major insulation of high temperature superconducting (HTS) cables. Effects of electrical aging on the breakdown performance and trap distribution of PPLP insulation are studied by AC breakdown and isothermal surface potential decay (ISPD) measurements. And the aged samples are further analyzed by Fourier transform infrared spectrum, morphology observation and thermogravimetric analysis. Results show that with the increase of electrical aging degree, AC breakdown field strength of PPLP insulation decreases from 113.3 kV/mm to 92.3 kV/mm. The density of shallow traps increases gradually while that of deep traps decreases gradually during aging

process. It is observed that the partial cellulose in the insulating paper of the PPLP out layer is broken, and a great number of voids are generated, resulting in loose structure and reduced strength. The IR absorption peak intensities of hydrogen bond and glycoside bond in the insulating paper decrease. Meanwhile, the temperature of fastest thermal weight loss of insulating paper decreases, while the thermal weight loss of polypropylene keeps stable. The experimental results reveal that the degradation of PPLP insulation performances during aging is mainly attributed to the deterioration of insulating paper. The analysis shows that the glycoside bonds in the main chain of cellulose and the hydrogen bonds between cellulose molecules break under the impact of high energy electrons. As a result, the interaction force among molecular chains weakens and the structural compactness decreases. The internal free volume of insulating paper increases, and the binding ability of cellulose molecular chains to charges weakens, so the electric charges migrate more easily between molecular chains, resulting in the decrease of deep trap density and AC breakdown field strength of PPLP insulation.

Keywords: electrical aging; polypropylene laminated paper; trap; breakdown; cellulose

近年来,我国用电量的持续增长和传输容量的不断增大对传统的输电技术提出了更高的要求。相比于传统输电电缆,高温超导(HTS)电缆具有更大的传输容量和更高的功率密度,是降低传输损耗和实现电网大容量输运的重要选择之一^[1-4]。在液氮条件下,HTS电缆材料的传输电流密度比传统铜制导体至少高两个数量级,同时,冷却介质液氮具有无污染、无火灾隐患等优点,因此 HTS 电缆的有效使用是提高传统电网传输容量和优化现有电力系统的可靠途径^[2,5]。

电缆绝缘结构是 HTS 电缆不可或缺的组成部分,并为超导电缆的安全运行提供必要的保障。聚丙烯层压纸(PPLP)凭借其优异的低温性能,在用作 HTS 电缆绝缘材料方面表现出极大的潜力^[6]。PPLP 兼具纤维纸良好的浸渍性和聚丙烯(PP)低温下的优异机械性能与电气强度,是一种优异的低温绝缘材料^[7]。

目前,针对 PPLP 材料的介电性能,国内外学者进行了部分相关研究。Kim 等在液氮条件下对 PPLP 的体积电阻率和击穿特性进行了表征,发现在液氮温度下,PPLP 的体积电阻率约为 10^{16} 数量级,且随着液氮压力的增大,PPLP 的击穿场强逐渐提高,当压力达到 0.3 MPa 时趋于稳定;同时,空间电荷集聚是 PPLP 电缆绝缘设计需要考虑的一个关键问题^[8]。Hayakawa 等研究了液氮/PPLP 复合绝缘系统在脉冲/交流复合电压作用下的局部放电特性,发现在交流电压低于本征局部放电起始电压的情况下仍然能引发局部放电,这是由于脉冲电压可触发局部放电的发生,并在随后的交流电压作用下

引起连续放电^[9]。Seo 等研究了直流条件下单极性逐级升压以及极性反转两种条件下液氮/PPLP 复合绝缘系统的击穿特性,结果表明两种情况下复合绝缘系统的击穿机理不同,且后者的击穿场强比前者低 10%^[10]。刘志凯等研究了不同层数的 PPLP 在液氮中的工频击穿特性,发现多层 PPLP 击穿场强随层数的增加逐渐降低并趋于稳定,且单层 PPLP 击穿路径发生在高压电极的边缘,而层间液氮的局部放电是多层 PPLP 击穿场强降低的原因^[11]。Xu 等采用电声脉冲法研究了 PPLP 的空间电荷特性,发现其三层结构的界面处会形成电荷迁移的屏障与陷阱,导致界面处空间电荷的大量集聚^[12]。目前,国内外针对 PPLP 绝缘材料的局部放电、交直流击穿以及空间电荷特性已有较为系统的研究,而电老化对 PPLP 微观结构以及介电性能的影响尚不清晰,仍需进一步研究。

本文模拟 HTS 电缆的运行工况,对 PPLP 绝缘材料进行了不同程度的电老化,通过交流击穿及等温表面电位衰减(ISPD)法^[13]对 PPLP 老化前后击穿和陷阱特性进行了测试,结合傅里叶红外光谱(FTIR)、热重分析(TG)法以及扫描电子显微镜(SEM)分析电老化对 PPLP 交流击穿及陷阱特性的影响机理。需要指出的是,本文的相关测试实验并非在液氮温度下进行,但测试结果可对 PPLP 绝缘电老化前后性能的变化规律,并通过其性能的改变进一步分析 PPLP 绝缘材料在实际运行环境下的劣化机理。本文可为 PPLP 绝缘材料在 HTS 电缆中的进一步应用提供理论基础。

1 实验过程

1.1 试样制备

试样为商用 PPLP 薄膜,图 1 所示为 PPLP 试样截面的 SEM 图像。从图中可以看出,PPLP 试样具有明显的 3 层结构,外侧两层为绝缘纸,中间部分为 PP,试样厚度约为 110 μm 。

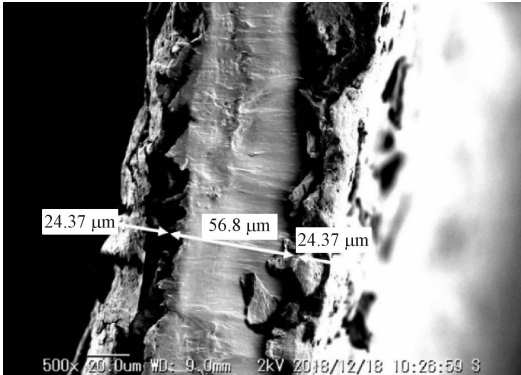


图 1 PPLP 试样截面 SEM 图像

在液氮条件下对 PPLP 试样进行不同程度的电老化,老化实验系统示意图如图 2 所示。铝棒直径约为 25 mm,外层高压电极宽度约为 100 mm。将 PPLP 试样交叠绕包在外屏蔽层上,绕包层数为 6 层,对高压电极施加工频交流电压,铝棒接地。同时,为模拟 PPLP 绝缘实际服役情况,在老化过程中对液氮施加 0.4 MPa 的压力。

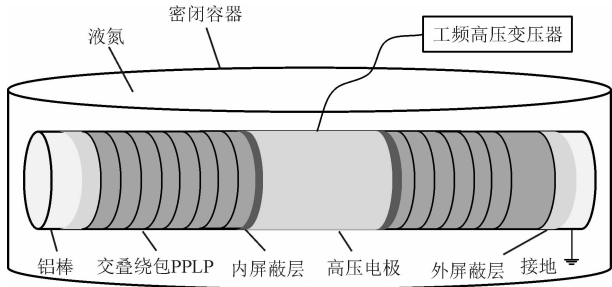


图 2 电老化实验系统示意图

通过设定一个高于 PPLP 绝缘材料实际运行时所耐受的场强以达到加速老化的目的。前期为了确定老化电压值,通过高场电导实验测得 PPLP 试样的电老化阈值场强,后期通过若干次加压实验发现电压过高时易在电极边缘处发生短时击穿。综合考虑上述两点因素,选取了本文所采用的老化电压值。具体的老化条件如表 1 所示。可以看出,4 种试样的老化条件逐步提高,老化程度逐渐加深。对老化后的试样取高压电极覆盖下的 PPLP 薄膜进行后续测试。

表 1 PPLP 试样老化条件及编号

试样编号	老化条件
A	未老化
B	工频 28 kV,加压 7 min
C	工频 30 kV,加压 23 min
D	工频 30 kV,加压 60 min

1.2 等温表面电位衰减实验

ISPD 测量装置示意图如图 3 所示。采用电晕放电方式对薄膜试样表面充电。其中,针电极与栅极的距离为 5 mm,栅极与薄膜试样的距离为 5 mm。在实验过程中,分别对针极和栅极施加 -12 kV 和 -2 kV 的直流电压。将试样放置在铝板上进行充电,铝板接地,充电 3 min 后撤去电压,然后在尽量短的时间内将试样与铝板移至静电电位探头下测试表面电位随时间的衰减规律,测量时间为 2 h。实验系统放置在恒温屏蔽箱中,箱中相对湿度为 30%,实验温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

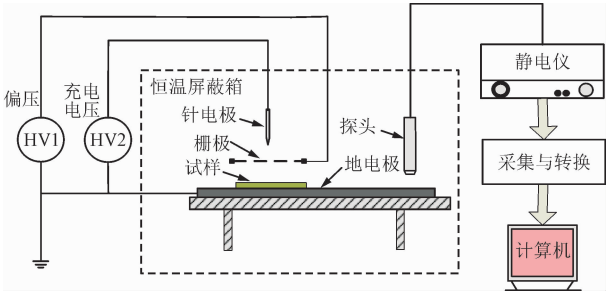


图 3 表面电位测量系统示意图

1.3 工频交流击穿测试

工频交流击穿实验所用电极结构为球-球电极。球电极直径为 20 mm,电极材料为黄铜。为了避免实验过程中沿面闪络对测试结果产生影响,将试样浸没在变压器油中进行击穿测试。以 1 kV/s 的升压速率进行连续升压,对于每组试样至少获得 10 个有效击穿点,实验温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.4 傅里叶红外光谱测试

使用 NICOLET-iN10 型红外光谱仪对 PPLP 样品进行红外光谱测试,扫描模式为衰减全反射,测量波数范围为 $4\text{ }000\sim400\text{ cm}^{-1}$ 。

1.5 扫描电子显微镜观测

采用 KEYENCE VE9800 型扫描电子显微镜对 PPLP 试样的微观形貌进行观测。采用高真空离子溅射仪在 PPLP 试样表面溅射一层薄金电极,观测时电子加速电压为 15 kV 。

1.6 热重分析

采用 TG/SDTA 851e 型热重分析仪对试样进行热重分析。实验中试样初始质量约为 6 mg,测量温度范围为 50~650 ℃,升温速率为 10 ℃/min,保护气体为氮气。

2 实验结果

2.1 工频交流击穿特性

采用 Weibull 统计对 PPLP 击穿场强数据进行分析处理。Weibull 分布的尺度参数与形状参数如表 2 所示,其中尺度参数代表试样的击穿场强,形状参数代表数据的分散性。

表 2 PPLP 交流击穿场强 Weibull 分布参数		
试样编号	尺度参数/(kV·mm ⁻¹)	形状参数
A	113.3	15.7
B	109.3	11.8
C	101.9	14.6
D	92.3	11.3

电老化对 PPLP 试样击穿场强的影响如图 4 所示。从图中可以看出,随着老化程度的增大,PPLP 试样的击穿场强明显降低,未老化 PPLP 试样的击穿场强为 113.3 kV/mm,而在工频 30 kV 下加压 60 min 后,PPLP 试样的击穿场强降为 92.3 kV/mm,降低了约 18.5%。

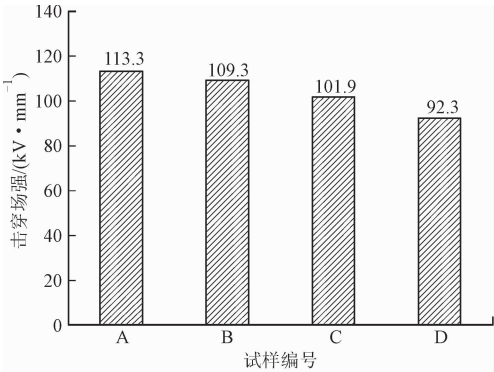


图 4 电老化对 PPLP 击穿场强的影响

2.2 陷阱分布特性

图 5 所示为 PPLP 试样的等温表面电位衰减曲线,横纵坐标分别表示试样的衰减时间和表面电位。从图中可以看出,试样 A 的表面电位衰减最慢,而试样 D 则具有最大的表面电位衰减速率,即 PPLP 试样的等温表面电位衰减速率随老化程度的增大逐渐增大,且 4 种试样均表现为前期(<1 000 s)衰减速率极大,并在较短的时间内趋于稳定。基于等温

表面电位衰减曲线计算得到试样在室温下的陷阱能级分布^[14-15],如图 6 所示。图中每条曲线上第一个和第二个峰值分别代表浅陷阱和深陷阱分布。PPLP 试样陷阱能级分布在 0.8~1.1 eV 范围内,且随着老化程度的增大,陷阱分布向低能级方向移动,深陷阱密度由 4.7×10²⁰ m⁻³降低至 3.2×10²⁰ m⁻³,浅陷阱密度由 8.2×10²⁰ m⁻³增大至 9.5×10²⁰ m⁻³。

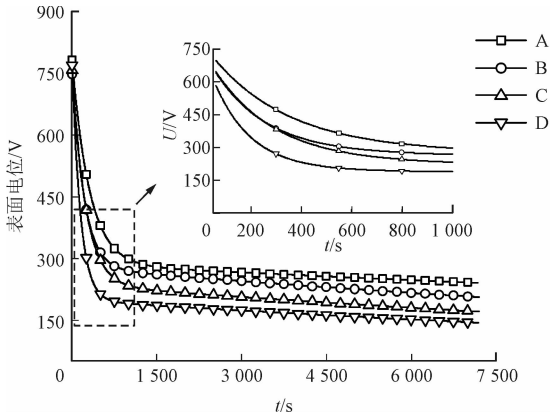


图 5 PPLP 试样等温表面电位衰减曲线

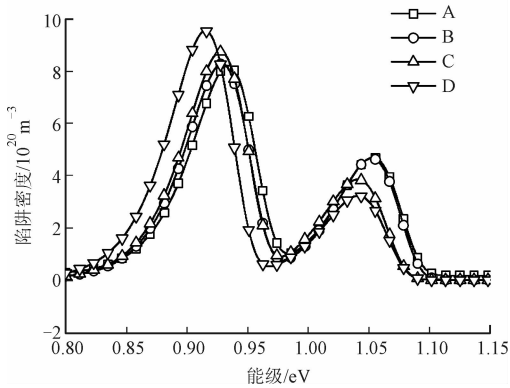


图 6 PPLP 试样陷阱能级分布曲线

2.3 微观结构

PPLP 试样的红外光谱图如图 7 所示。由于测试过程中采用的是衰减全反射模式,得到的谱图为 PPLP 表层绝缘纸的红外光谱,图中 3 346 cm⁻¹对

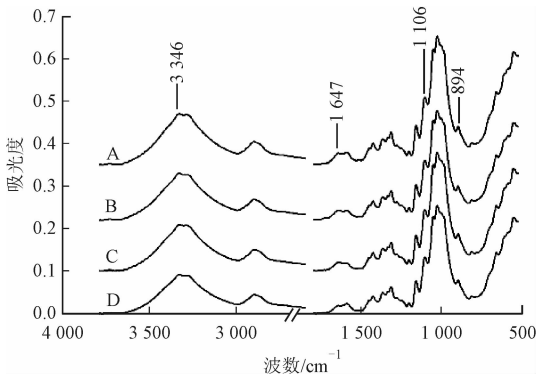


图 7 PPLP 试样红外光谱图

应 O—H 键的伸缩振动峰,1 647 cm^{-1} 对应 H—O—H 的伸缩振动,因此,这两个波数所对应的峰值可用于表征试样中氢键的含量;1 106 cm^{-1} 和 894 cm^{-1} 波数对应 C—O—C 的振动峰,可用于表征绝缘纸中葡萄糖单体上糖苷键的含量。

从图 7 可见,随着电老化程度的增大,PPLP 试样红外光谱吸收峰的位置没有发生明显变化,吸收峰的数量也没有发生改变,表明电老化前后 PPLP 分子中的主要官能团种类没有发生变化。从表 3 可以看出,随着老化程度的增大,4 个波数段所对应的红外吸收峰的吸光度均有所减弱,说明在老化过程中,PPLP 试样的外层绝缘纸中氢键以及糖苷键发生了一定程度的断裂。

表 3 PPLP 试样特征官能团吸光度

试样	吸光度			
	3 346 cm^{-1}	1 647 cm^{-1}	1 106 cm^{-1}	894 cm^{-1}
A	0.108 3	0.027 5	0.132 6	0.055 6
B	0.101 4	0.024 0	0.124 1	0.053 2
C	0.099 5	0.021 3	0.118 3	0.049 3
D	0.082 7	0.020 7	0.114 3	0.044 6

2.4 热失重特性

试样 A 与 D 的热失重曲线如图 8 所示。由图 8 可见,PPLP 的热失重过程分为两个阶段,第一阶段的温度范围为 250~380 $^{\circ}\text{C}$,为绝缘纸的热裂解主反应的温度区间;第二阶段为 400~500 $^{\circ}\text{C}$,对应 PP 的热裂解温度区间。对热失重曲线进行一次微分可得到微商热重曲线(DTG 曲线),如图 9 所示,它反映样品质量变化率随温度的变化规律。从图 9 中可以看出,电老化前后,PPLP 试样的第一分解阶段存在一定的差异,而第二分解阶段基本保持一致。试样 D 外层绝缘纸的最快分解温度为 347.3 $^{\circ}\text{C}$,低于试样 A 的最快分解温度(351.7 $^{\circ}\text{C}$),同时,试样 D 的热失重速率要大于试样 A 的热失重速率。

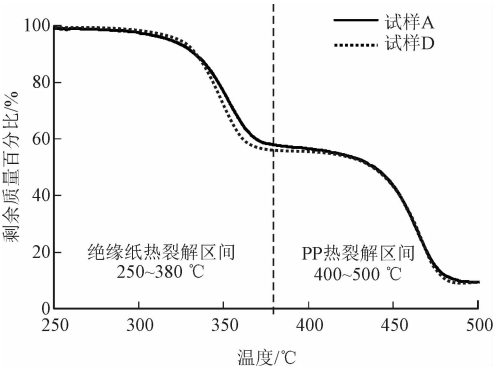


图 8 试样 A 与试样 D 热失重曲线图

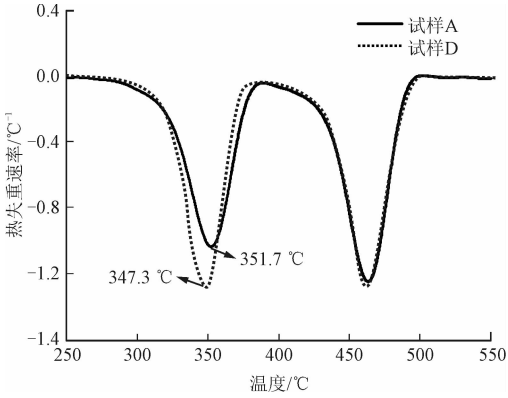


图 9 试样 A 和试样 D 的 DTG 曲线

结合 SEM 与 FTIR 的测试结果,电老化作用后 PPLP 外层绝缘纸内部的部分分子链段发生了断裂,在热裂解过程中,绝缘纸裂解所需的能量会降低,因此,电老化作用后,绝缘纸的最快分解温度降低,同时,热失重速率增大。基于上述结果,可以推测,在电老化过程中,PPLP 外层绝缘纸发生了一定程度的老化,而中层 PP 未发生明显老化,因此,接下来主要讨论外层绝缘纸结构的改变对 PPLP 性能的影响。

3 分析与讨论

3.1 微观结构的破坏及其对陷阱特性的影响

基于红外光谱的测试结果可以发现,在电老化过程中,PPLP 外层绝缘纸内部的部分分子链段发生了断裂。纤维素的分子链结构如图 10 所示,纤维素分子由若干葡萄糖单体组成,相互之间以糖苷键“C—O—C”相连,葡萄糖单体上存在 3 个游离的羟基,当羟基中的氢原子与邻近电负性较强的氧原子相互靠近时会形成氢键,氢键的形成会增大纤维素分子间的相互作用力,促进纤维素分子链的紧密排列,并增加其有序化程度^[16]。在电老化过程中,3 346 cm^{-1} 和 1 647 cm^{-1} 波数所对应的吸光度有所下降,说明部分氢键在老化过程中遭到高能电子的撞击而发生了断裂;同时,1 106 cm^{-1} 和 894 cm^{-1} 波数所对应的吸光度也有所减弱,表明纤维素主链上的糖苷键在老化过程中也发生了断裂。氢键的断裂导致 PPLP 中致密的纤维素结构和有序分子结构

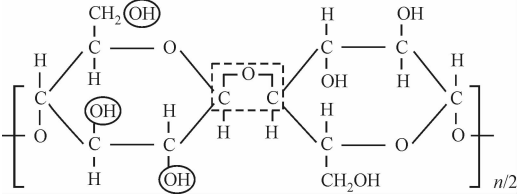


图 10 纤维素分子链结构

遭到破坏,结构完整性明显下降。糖苷键断裂表明纤维素分子的主链结构遭到了破坏,高分子链段裂解为小分子链段,分子内部作用力降低,结构致密性降低。

图 11 所示为电老化前后 PPLP 试样的 SEM 图像。可以看出,试样 A(未老化)的表面绝缘纸结构致密,纤维素相互之间结合紧密,孔隙较少;而随着老化程度的加深,PPLP 试样表面的绝缘纸结构逐渐松散,纤维素之间出现了较大的孔隙(试样 B 和 C);试样 D 表面的纤维素甚至发生了明显断裂,进一步验证了红外光谱的分析结果。

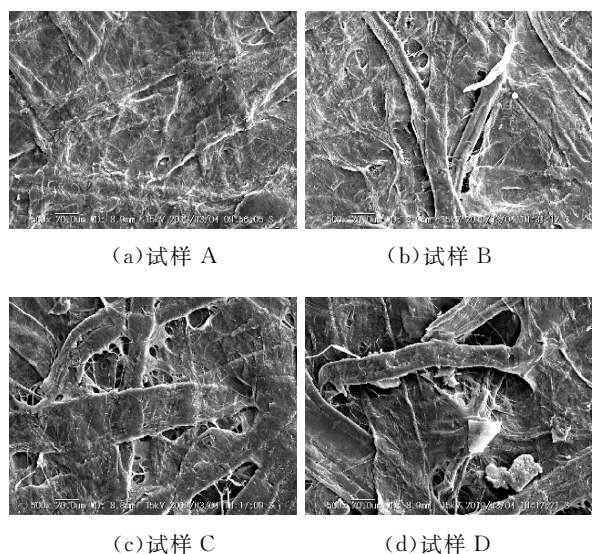


图 11 电老化前后 PPLP 试样表面微观形貌

PPLP 微观结构的改变会影响其陷阱分布。图 12 所示为 PPLP 试样的深浅陷阱密度。随着电老化程度的增大,PPLP 试样深陷阱密度逐渐减小,而浅陷阱密度逐渐增大。PPLP 在电老化过程中,外层绝缘纸中出现大量孔隙,结构趋于松散,内部物理缺陷增多,导致浅陷阱密度逐渐增大^[17];纤维素分子链在高能电子的撞击作用下发生断裂,分子间的相互作用力减弱,纤维素分子链对电荷的束缚能力减弱,电荷更容易在分子链间发生迁移,因此,深陷阱

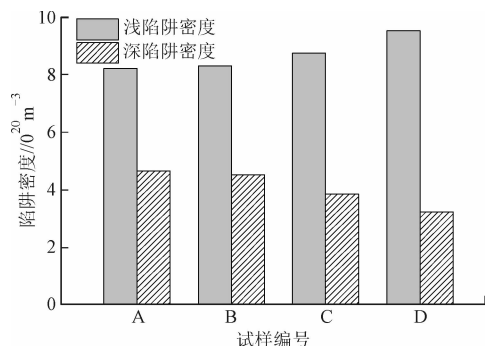


图 12 电老化对 PPLP 陷阱密度的影响

阱密度逐渐降低^[18];纤维素分子结构的破坏会导致其自由体积增大,引起浅陷阱密度的增大和深陷阱密度的减小。因此,PPLP 外层绝缘纸内部分子链结构的断裂以及自由体积的增大,均会导致 PPLP 深陷阱密度的减小与浅陷阱密度的增大。

3.2 陷阱分布变化对交流击穿特性的影响

在老化过程中,PPLP 外层绝缘纸发生了一定程度的劣化,绝缘纸内部自由体积增大,纤维素分子链间相互作用力减弱,对电荷迁移的阻碍作用降低。绝缘纸在变压器油中的击穿场强约为 40 kV/mm^[19],而 PP 的交流击穿场强约为 130 kV/mm^[20],在击穿过程中,由于绝缘纸的击穿场强远低于 PP,绝缘纸层将先于 PP 层发生击穿。根据多层介质击穿理论,当外层绝缘纸发生击穿后,所施加的电场将全部集中于中层 PP,加速了 PP 层的击穿。随着电老化程度的继续增大,纤维素分子链段对电荷迁移的阻碍作用降低;同时,自由体积的增大导致载流子碰撞电离的平均自由程增大,载流子碰撞电离产生的能量增强,对绝缘纸分子链段的破坏作用增强,其介电强度进一步下降。因此,绝缘纸层将在更低的场强下发生击穿,进而导致 PPLP 整体击穿场强的降低。

结合陷阱分布的变化规律,发现 PPLP 的击穿场强及深陷阱密度均随老化程度的加深而降低,而浅陷阱密度则有所增加。在 PPLP 绝缘击穿过程中,当介质内部深陷阱密度减小后,载流子在介质内部输运过程中被深陷阱捕获的概率将会降低;深陷阱能级下降,电子入陷后以非辐射形式转移给另一个电子(热电子)的能量降低,同时,较低的深陷阱能级会导致电荷的出陷势垒降低,在外部激励作用下,电荷更容易在较短的时间内从陷阱中逃逸;而浅陷阱密度的增大会缩小浅陷阱的平均间距,电荷更容易在浅陷阱间进行跳跃,有利于电荷的迁移^[21]。因此,在深浅陷阱的作用下,PPLP 介质内部载流子的输运过程将会增强,载流子迁移率增大,加速对分子链的破坏,宏观上表现为击穿场强的降低。

4 结 论

本文对超导电缆用 PPLP 绝缘材料进行电老化实验,获得了不同老化程度的 PPLP 试样。采用交流击穿和 ISPD 测试研究了电老化对 PPLP 绝缘击穿特性及陷阱特性的影响,并结合 SEM 和 FTIR 实验分析其影响机理,得到以下结论。

(1)随着电老化程度增大,PPLP 绝缘击穿场强由 113.3 kV/mm 下降至 92.3 kV/mm,降低了约

18.5%;同时,深陷阱密度由 $4.7 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 降低至 $3.2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$,浅陷阱密度由 $8.2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 增大至 $9.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 。

(2)在电老化过程中,PPLP 外层绝缘纸在 $3\ 346 \text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 647 \text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 106 \text{ cm}^{-1}$ 和 894 cm^{-1} 波数段的吸收峰逐渐减弱,表明绝缘纸中纤维素主链上的糖苷键及分子链间的氢键在高能电子的撞击下发生断裂,进而导致绝缘纸结构趋于松散,表面出现大量孔隙。

(3)随着电老化程度的加深,PPLP 外层绝缘纸中纤维素分子间相互作用力减小,纤维素分子链段对电荷的束缚能力减弱,自由体积增大,电荷更易在分子链间进行迁移,故深陷阱密度减小,浅陷阱密度增大,同时,击穿场强降低。

参考文献:

- [1] 焦振. 高温超导电缆线路对电网可靠性的影响 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014: 1-3.
- [2] 王银顺, 张瀚. 高温超导电缆的研发现状和发展趋势 [J]. 电工电能新技术, 2017, 36(10): 8-18.
WANG Yinshun, ZHANG Han. Developing status and trend of high temperature superconducting cable [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(10): 8-18.
- [3] 蒋晓华, 要鹏飞. 超导电缆的应用系统: 柔性超导直流配电环网综述 [J]. 电工电能新技术, 2017, 36(10): 35-40.
JIANG Xiaohua, YAO Pengfei. Application systems of HTS-flexible HTS DC distribution closed-loop network; an overview [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(10): 35-40.
- [4] 李红雷, 林一, 黄兴德. 高温超导电缆在大都市电网的应用前景 [J]. 电力与能源, 2017, 38(3): 255-257.
LI Honglei, LIN Yi, HUANG Xingde. Application of high temperature superconducting cable in the metropolitan power grid [J]. Power & Energy, 2017, 38(3): 255-257.
- [5] NAKIRI T, MAEKAWA Y, TAKASHIMA H, et al. Long-term reliability testing of 500 kV DC PPLP-insulated oil-filled cable and accessories [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2): 319-326.
- [6] KIM W J, KIM S H, KIM H J, et al. The fundamental characteristics of PPLP as insulating material for HTS DC cable [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23(3): 5401704.
- [7] 张洋瑞. 高电压冷绝缘高温超导电缆的主绝缘设计 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011: 7-8.
- [8] KIM S H, CHIO J H, KIM W J, et al. Electrical insulation characteristics of PPLP as a HTS DC cable dielectric and GFRP as insulating material for terminations [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(3): 7700104.
- [9] HAYAKAWA N, YAMAGUCHI R, UKAI Y, et al. Partial discharge activities under AC/impulse superimposed voltage in LN_2 /polypropylene laminated paper insulation system for HTS cables [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2010, 234(3): 032020.
- [10] SEO I, CHIO W, SEONG J, et al. Experimental and analytical study of the DC breakdown characteristics of polypropylene laminated paper with a butt gap condition considering the insulation design of superconducting cable [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 53: 08NL04.
- [11] 刘志凯, 李卫国, 魏斌, 等. 液氮下聚丙烯层压纸层数对绝缘交流击穿场强的影响研究 [J]. 低温工程, 2013(5): 52-56.
LIU Zhikai, LI Weiguo, WEI Bin, et al. Study on layers effect of polypropylene laminated paper for AC breakdown strength of insulation [J]. Cryogenics, 2013(5): 52-56.
- [12] XU Zhiqiang, SU Wen, CHEN G. Space charge properties of PPLP insulation [C]//2016 IEEE Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 153-156.
- [13] ZHOU F S, LI J Y, LIU M J, et al. Characterizing trap distribution in LDPE and HDPE through isothermal surface potential decay method [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(2): 1174-1182.
- [14] 刘孟佳, 周福升, 陈铮铮, 等. 采用等温表面电位衰减法表征 LDPE 与 HDPE 内陷阱的分布特性 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 285-291.
LIU Mengjia, ZHOU Fusheng, CHEN Zhengzheng, et al. Characterizing trap distribution in LDPE and HDPE based on isothermal surface potential decay measurement [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 285-291.
- [15] 欧阳本红, 赵健康, 周福升, 等. 基于等温表面电位衰减法的直流电缆用低密度聚乙烯和交联聚乙烯陷阱电荷分布特性 [J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 222-229.
OUYANG Benhong, ZHAO Jiankang, ZHOU Fusheng, et al. Characteristics of trapped charge distribution in LDPE and XLPE used in DC cables based on

- isothermal surface potential decay method [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 222-229.
- [16] 廖瑞金, 周旋, 杨丽君, 等. 变压器油纸绝缘热老化过程的中红外光谱特性 [J]. 重庆大学学报, 2011, 34(2): 1-6.
- LIAO Ruijin, ZHOU Xuan, YANG Lijun, et al. The mid-infrared spectra characteristic of the transformer oil-paper insulation in thermal ageing process [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(2): 1-6.
- [17] MEUNIER M, QUIRKE N. Molecular modeling of electron trapping in polymer insulators [J]. The Journal of Chemical Physics, 2000, 113(1): 369-376.
- [18] 李伟, 廖瑞金, 袁秀娟, 等. 热老化对纤维素绝缘纸的空间电荷及陷阱特性的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 145-153.
- LI Wei, LIAO Ruijin, YUAN Xiujuan, et al. Effects of thermal aging on space charge and trap characteristics of cellulose insulation papers [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 145-153.
- [19] 黄建文, 周远翔, 金福宝, 等. 针叶木原浆种类对绝缘纸性能的影响 [J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1862-1869.
- HUANG Jianwen, ZHOU Yuanxiang, JIN Fubao, et al. Effect of kraft pulp type on insulation performances of presspaper [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1862-1869.
- [20] 李喆, 龚瑾, 操卫康, 等. 聚丙烯绝缘材料电导特性与空间电荷研究 [J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1451-1457.
- LI Zhe, GONG Jin, CAO Weikang, et al. Research of conductive characteristics and space charge on polypropylene insulation material [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1451-1457.
- [21] 袁端磊, 闵道敏, 黄印, 等. 掺杂含量对环氧纳米复合电介质陷阱与空间电荷的影响 [J]. 物理学报, 2017, 66(9): 329-336.
- YUAN Duanlei, MIN Daomin, HUANG Yin, et al. Influence of filler content on trap and space charge properties of epoxy resin nanocomposites [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(9): 329-336.
- [本刊相关文献链接]
- 李乃一, 彭宗仁. 气固绝缘系统电场模型的建立与求解方法. 2019, 53(6): 151-160, 168. [doi:10.7652/xjtuxb201906020]
- 李丽, 郭泽, 邹庄磊, 等. 替代气体的饱和蒸气压特性研究. 2019, 53(3): 157-163. [doi:10.7652/xjtuxb201903022]
- 吴撼宇, 曾正中, 邱孟通, 等. 高功率单孔柱-孔汇聚结构的电流损失实验研究. 2019, 53(8): 135-140. [doi:10.7652/xjtuxb201908018]
- 何佳熹, 钟力生, 宋晓源, 等. 细胞带电分析中显微细胞聚集度的数值表征方法. 2018, 52(4): 1-6. [doi:10.7652/xjtuxb201804001]
- 刘小军, 祝令瑜, 汲胜昌, 等. 中压直流供电系统远端站点接地状态扫频阻抗检测法. 2019, 53(8): 141-150, 182. [doi:10.7652/xjtuxb201908019]
- 潘亮, 陈世瑛, 张健, 等. 柔性直流输电电子模块电容器电容值在线获取方法. 2019, 53(6): 161-168. [doi:10.7652/xjtuxb201906021]
- 孙晋茹, 姚学玲, 田向渝, 等. 碳纤维增强型复合材料在非破坏雷电流脉冲下的动态导电特性. 2019, 53(2): 80-87. [doi:10.7652/xjtuxb201902011]
- 师泯夏, 侯志强, 张芊, 等. 电工钢片矢量磁特性测量系统的设计与优化. 2019, 53(2): 88-95. [doi:10.7652/xjtuxb201902012]
- 孙泽明, 庞培川, 张芊, 等. 基于可听声波的 GIS 击穿点定位方法. 2018, 52(10): 88-94. [doi:10.7652/xjtuxb201810012]
- 韩旭涛, 刘泽辉, 张亮, 等. GIS 中局部放电光信号传播特性仿真研究. 2018, 52(6): 128-134. [doi:10.7652/xjtuxb201806019]
- 崔彦捷, 彭平, 曹沛, 等. 针板电极下局部放电对油浸绝缘纸板表面的影响. 2017, 51(4): 37-44. [doi:10.7652/xjtuxb201704006]
- 刘衍, 周求宽, 赵晶轩, 等. 交互区对纳米 Al_2O_3 -环氧树脂复合电介质短时击穿特性的影响. 2016, 50(12): 18-23. [doi:10.7652/xjtuxb201612004]
- 李乃一, 彭宗仁, 刘鹏. 直流电压下环氧浇注绝缘子的表面电场分析. 2016, 50(2): 73-79. [doi:10.7652/xjtuxb201602013]
- 陈向荣, 玉林威, 刘海燕, 等. 电压稳定剂改善聚乙烯共混材料绝缘性能的研究. 2019, 53(12): 87-96. [doi:10.7652/xjtuxb201912012]
- 徐亮, 龙艳, 张高爽, 等. 节点解析法研究特高压廊管气体绝缘输电线路的热特性. 2018, 52(5): 125-132. [doi:10.7652/xjtuxb201805018]
- 李志伟, 金海云, 张涛, 等. 脱气时间对交联聚乙烯电缆绝缘材料聚集态结构与链结构的影响. 2018, 52(4): 15-23. [doi:10.7652/xjtuxb201804003]
- 李文栋, 刘哲, 有晓宇, 等. 叠层式介电功能梯度绝缘子的介电常数分布优化. 2016, 50(10): 19-26. [doi:10.7652/xjtuxb201610004]
- 陈智勇, 罗传仙, 张静, 等. 电老化与加速水树老化对交联聚乙烯绝缘理化特性的影响. 2015, 49(4): 32-39. [doi:10.7652/xjtuxb201504006]

(编辑 亢列梅)