



·高功率微波技术专辑·

超导电缆用低介损复合绝缘材料性能研究^{*}

王明洋¹, 董海莲², 贺鹏宇², 江 滔¹

(1. 国网天津市电力公司高压分公司, 天津 300232; 2. 中国电子信息产业集团有限公司, 北京 100080)

摘 要: 超导电缆相比于传统电缆具有导体无电阻损耗、传输容量大、可靠性高等优势, 但作为其主绝缘的聚丙烯层压纸因具有较高的损耗因数导致超导电缆运行中的介质损耗大, 增大冷却系统的负荷。采用具有低损耗因数的聚四氟乙烯滤纸取代聚丙烯层压纸中的牛皮纸层, 通过热压法与聚丙烯膜形成具有两侧多孔可浸润液氮的三明治结构复合绝缘, 测试结果表明超导电缆中以聚四氟乙烯/聚丙烯复合材料取代聚丙烯层压纸作为主绝缘, 将使介质损耗降低一半以上。同时, 由于聚四氟乙烯/聚丙烯复合材料与高温超导电缆中作为冷却剂的液氮间更小的介电常数差异以及液氮击穿的体积效应, 采用具有更小孔径的聚四氟乙烯滤纸制成的低介损复合绝缘具有更强的抗局部放电的能力和更高的交流绝缘击穿强度, 可极大提升高温超导电缆的绝缘可靠性。

关键词: 超导电缆; 介质损耗; 复合绝缘; 局部放电; 绝缘击穿

中图分类号: TM85

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230450

Study on the properties of low dielectric loss composite insulating materials for superconducting cables

Wang Mingyang¹, Dong Hailian², He Pengyu², Jiang Tao¹

(1. State Grid Tianjin High Voltage Company, Tianjin 300232, China;

2. China Electronics Corporation, Beijing 100080, China)

Abstract: Compared with traditional cables, superconducting cables have the advantages of no resistance loss, large transmission capacity and high reliability. However, polypropylene laminated paper as its main insulation has high loss factor, which leads to large dielectric loss in the operation of superconducting cables and increases the load of cooling system. In this paper, polytetrafluoroethylene filter paper with low loss factor is used to replace the kraft paper layer in the polypropylene lamination paper, and a sandwich structure composite insulation with porous surface can be formed by being hot-pressed with the polypropylene film. The test results show that replacing the polypropylene lamination paper with polytetrafluoroethylene/polypropylene composite material as the main insulation in the superconducting cable will reduce by more than half the dielectric loss. At the same time, due to the smaller dielectric constant difference between the polytetrafluoroethylene/polypropylene composite material and the liquid nitrogen used as the coolant in the high temperature superconducting cable and the volume effect of liquid nitrogen breakdown, the low dielectric loss composite insulation made of polytetrafluoroethylene filter paper with smaller aperture has stronger resistance to partial discharge and higher AC insulation breakdown strength, which can greatly improve the insulation reliability of the high temperature superconducting cable.

Key words: superconducting cable, dielectric loss, composite insulation, partial discharge, insulation breakdown

近年来, 超导技术的发展促进了高温超导电力设备的研究^[1]。由于其在低温下优异的绝缘性能, 聚丙烯层压纸 (PPLP) 和液氮 (LN₂) 分别被广泛用作高温超导电力设备中的主绝缘和冷却剂^[2]。介质损耗是高压超导电缆中的一个关键问题, 高介质损耗将导致超导电缆运行中的损耗增加, 从而增大冷却系统的负荷, 这主要是由于高工作电压下聚丙烯层压纸的高相对介电常数和高介电损耗角正切^[3]。局部放电是高温超导电缆中由多孔绝缘材料和液氮

* 收稿日期: 2023-12-28; 修订日期: 2024-02-26

联系方式: 王明洋, mywang@tju.edu.cn。

通信作者: 江 滔, 384466464@qq.com。

组成的复合绝缘体系所面临的另一个关键问题,局部放电会逐渐导致热累积和绝缘劣化,最终导致绝缘材料的击穿,绝缘系统故障最终会危及整个电力系统的安全运行。

国内外学者对液氮中绝缘材料的电荷动态行为、放电行为和击穿机理进行了大量研究。研究发现电荷在极低温下更容易积聚在绝缘材料中,且温度降低导致电荷的动态迁移率降低,通过陷阱分布测试计算发现液氮温区下电荷主要积聚在不易脱陷的深陷阱中^[4]。对于液氮中冷却剂与多孔材料组成的复合绝缘,局部放电主要发生在液氮中,液氮的体积对复合绝缘系统的局部放电行为起决定性作用,该理论可总结为体积效应^[5]。绝缘的电树枝劣化过程由局部放电引发,当电树能够桥接电极的两端时,将发生绝缘击穿^[6]。日本学者还有对低介电损耗绝缘材料开展了研究,发现特卫强/聚乙烯(Tyvek/PE)复合绝缘材料在具有多孔结构的同时具有较低的介电损耗因数,约为PPLP的20%^[7],但其并未对复合绝缘材料的局部放电和击穿特性开展实验研究和理论分析,其绝缘性能是否满足高温超导电缆的运行要求尚未可知。

本文选择具有大小两种不同孔径的聚四氟乙烯(PTFE)滤纸与聚丙烯膜层压,制成具有低介电损耗的多孔结构复合绝缘。利用LCR计(HP4278A, HP, USA)测量复合绝缘的相对介电常数和介电损耗角正切值,计算其介质损耗因数并与聚丙烯层压纸对比。此外,还通过实验测试了复合绝缘在液氮中的局部放电起始特性和绝缘击穿强度,以验证其取代聚丙烯层压纸作为高温超导电缆主绝缘的可行性。

1 实 验

1.1 试样制备

制备试样所用聚丙烯由中国石化扬子石化有限公司提供,其等规度约为97%。首先将聚丙烯颗粒在表面温度设置为190℃的双辊机上融化,待聚丙烯颗粒完全融化后保持双辊机表面温度不变并开启机器,在30 r/min的转速下运转10 min得到聚丙烯原样。将聚丙烯原样置于厚度为40 μm的不锈钢模具中,在190℃温度和15 MPa压力下热压10 min后自然冷却至室温,得到厚度为40 μm的聚丙烯薄膜。选取平均孔径为0.1 μm和1 μm的两种聚四氟乙烯滤纸,聚四氟乙烯滤纸的厚度为60 μm。将一片聚丙烯膜夹在两片聚四氟乙烯滤纸之间,将它们在厚度为120 μm的不锈钢模具中热压10 min,热压条件保持为压力15 MPa和温度190℃^[8],热压结束后自然冷却至室温,得到两种具有不同孔径的多孔聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘。

1.2 实验方法

用于测试绝缘试样的局部放电起始电压和绝缘击穿强度的实验装置示意图如图1所示。该电极系统由一对直径为25 mm的圆柱形铜电极组成,局部放电产生的脉冲电流信号由圈在接地线上的高频电流传感器采集,并输入到局部放电检测仪(PONONO PAP-300)中处理数据。将三层试样放置在两柱状电极之间,并由电极压紧。在低温杜瓦内盛满液氮后,将试样和整个电极系统浸入液氮中,即试样和整个电极系统处于液氮温区的实验环境下。在局部放电起始电压测试实验中交流电源的升压速率为0.1 kV/s,升压过程一直持续到局部放电发生即局部放电检测仪监测到放电信号,记录此时的电压幅值为局部放电起始电压^[9]。在绝缘交流击穿强度测试中,为避免测试中出现沿面放电的情况影响测试结果,两电极间夹有单层试样,测试中交流电源的升压速率为1 kV/s,直到发生绝缘击穿,记录绝缘击穿瞬间的交流电源输出幅值为击穿电压。每组测试重复10次,最终得到三层绝缘试样在液氮中的局部放电起始电压和单层绝缘试样的交流击穿强度。

2 讨 论

利用扫描电子显微镜观察制得的具有不同孔径的聚四氟乙烯滤纸/聚丙烯复合绝缘试样的表面和断面如图2所示。图2(a)为以孔径为0.1 μm的聚四氟乙烯滤纸为原料制成的绝缘材料(0.1PTFE)表面扫描电镜照片,图2(b)为以孔径为1 μm的聚四氟乙烯滤纸为原料制成的绝缘材料(1PTFE)表面扫描电镜照片,图2(c)为经热压工艺处理后聚四氟乙烯滤纸与聚丙烯薄膜的结合界面扫描电镜照片。在结构上,采用聚四氟乙烯滤纸与聚丙烯结合的方法

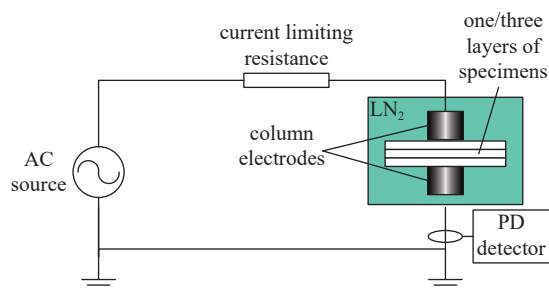


Fig. 1 Schematic diagram of partial discharge initial voltage (PDIV) and insulation breakdown voltage test apparatus

图1 局部放电起始电压和绝缘击穿电压测试实验装置示意图

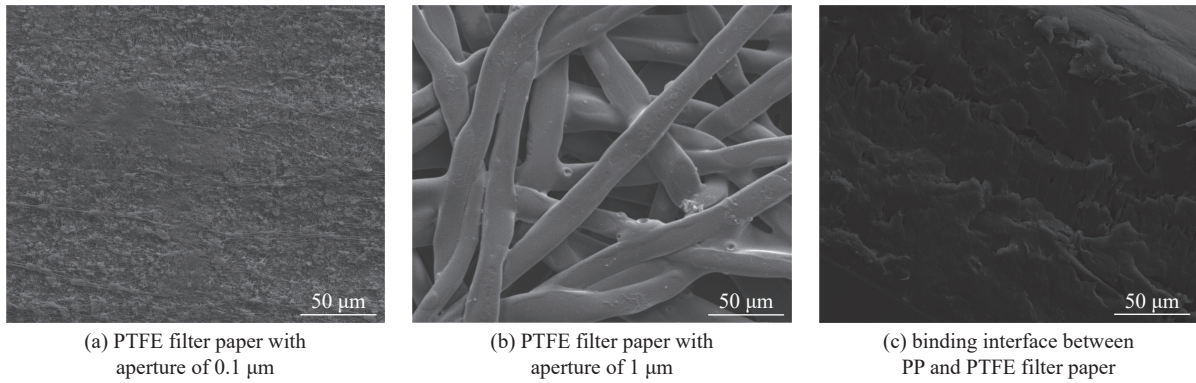


Fig. 2 SEM images of the surfaces and interface of PTFE/PP composite insulation with different apertures

图 2 具有不同孔径的聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘表面和界面扫描电镜照片

式,保证了新型绝缘材料与聚丙烯层压纸具有相同的多孔结构,使其在作为超导电缆的主绝缘时允许液氮浸润从而达到对超导体降温的作用。通过图 2(a)与图 2(b)的对比可知,具有更小孔径的聚四氟乙烯滤纸表面纤维具有更致密的结构,因而其聚四氟乙烯纤维间具有更小的空隙。从复合绝缘材料的断面扫描电镜照片可以看出,通过热压法得到的复合绝缘中聚四氟乙烯和聚丙烯两种物质的结合性较好,这可能是由于聚四氟乙烯滤纸的多孔结构,保证了绝缘在长期服役状态下的稳定性。

在液氮中用 LCR 表测量试样电容值和损耗,并计算得到测量电压 1 V、频率 50 Hz 下聚丙烯层压纸和聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘试样的相对介电常数、介电损耗角正切值分别如图 3(a)和图 3(b)所示。通过将实验结果计算得到的相对介电常数和介电损耗角正切值相乘得到介电损耗因数如图 3(c)所示。聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘的相对介电常数和介电损耗角正切值均低于聚丙烯层压纸,这可能是由于聚四氟乙烯滤纸和牛皮纸(Kraft Paper, KP)的内部结构不同,在低频范围内,材料的介电常数同时受位移极化和转向极化影响,聚四氟乙烯的分子链比牛皮纸纤维的分子链极化能力更弱,因此通过用聚四氟乙烯滤纸取代牛皮纸来与聚丙烯薄膜组成复合材料可以有效降低复合绝缘的介电常数和介质损耗角正切值。由聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘材料与聚丙烯层压纸的接电损耗因数计算结果对比可知,在高温超导电缆中使用聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘取代聚丙烯层压纸作为主绝缘,在相同的绝缘带绕包厚度下,高温超导电缆运行中来自于绝缘材料的介电损耗可以减少到一半。

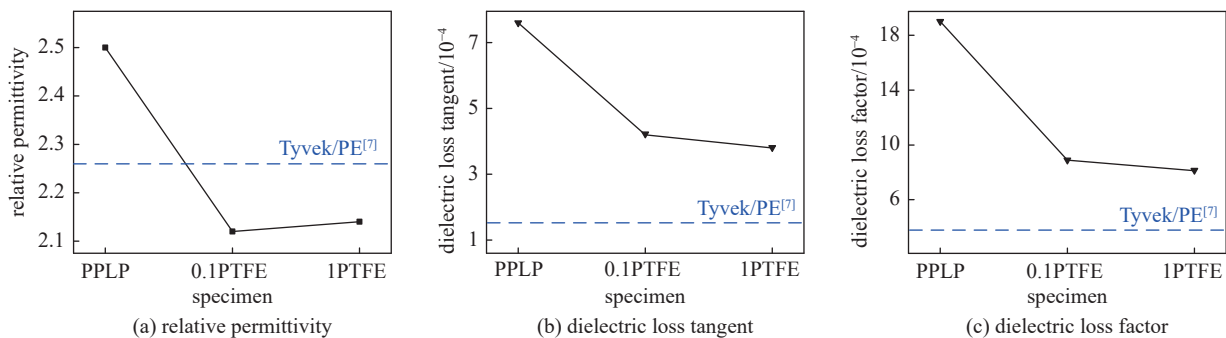

 Fig. 3 Polarization properties of PPLP and PTFE/PP composite insulation in LN₂ at 50 Hz

图 3 50 Hz 下液氮中聚丙烯层压纸和聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘的极化特性

液氮中聚丙烯层压纸和聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘材料三层试样的局部放电起始电压如图 4 所示,图中采用标么值的处理方式,通过将 10 次试验得到的局部放电起始电压值取平均数作为对应实验条件下对应试样的局部放电起始电压,并以三层聚丙烯层压纸在液氮中局部放电起始电压平均值 16.56 kV 作为基准,将三种试样的局部放电起始电压平均值与基准值的比值在折线图中作对比。两种不同孔径的聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘的局部放电起始电压均高于聚丙烯层压纸,因此可以得出结论,具有低介质损耗因数的聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘,同时具有比聚丙烯层压纸更强的抗局部放电能力。

液氮中三种试样的局部放电特性差异可用如图 5 所示的转化方法说明。对于聚丙烯层压纸和聚四氟乙烯滤纸/聚丙烯薄膜复合绝缘材料来说,当其处于液氮中时,液氮将充满多孔绝缘结构的空隙中,这与实际运行中的高温超导电缆主绝缘是相同的,因此在两电极中间形成了由聚四氟乙烯(或牛皮纸)、聚丙烯、液氮组成的复合绝缘

体系。在复合绝缘体系中,由于各组成物质的介电性能不同,在交流电压作用下各部分承担的电场强度不同,三种不同组成物质中电场强度与其介电常数成反比,其中液氮的介电常数最小,因此在复合绝缘体系中的液氮相承担的电场强度最高,同时液氮的击穿强度与其他两种物质相比更低,放电优先在液氮中发生从而引发局部放电。当使用聚四氟乙烯滤纸取代牛皮纸后,固体绝缘部分的介电常数与液氮的介电常数差异减小,液氮相分得的电场强度显著降低,需要更高的外施电压才能引发局部放电,因此聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘更低的介电常数有助于提升绝缘局部放电起始电压。同时,液氮的击穿特性具有体积效应^[5],这是由液氮中的杂质和气泡导致的,液氮体积与液氮的击穿场强呈负相关的关系。由图2中扫描电镜的分析结果可知,具有较大孔径的聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘的纤维间有更大的空隙体积,当复合绝缘浸没在液氮中时,由图5转化方式得到的液氮相所占比重更大,因此在具有较大孔径的聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘中液氮的击穿场强更低,导致绝缘局部放电起始电压的降低。

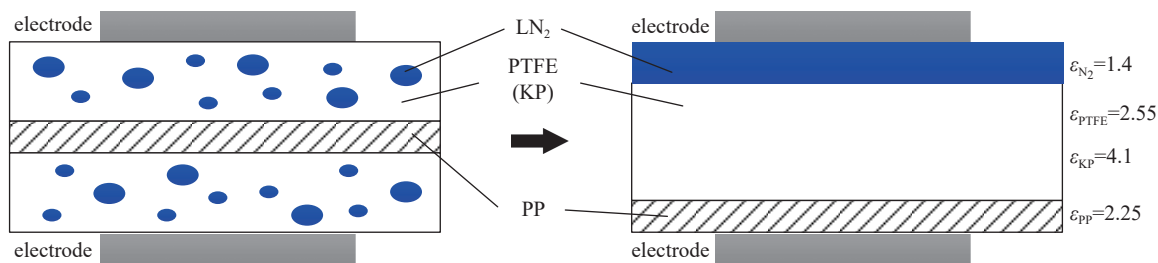


Fig. 5 Conversion of composite insulation system to separate material combination

图5 复合绝缘体系与独立物质组合的转化示意图

测得十次击穿单层聚丙烯层压纸和聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘试样所需电压,计算得到单层试样的交流击穿强度,将其采用双参数威布尔分布处理结果如图6所示。聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘的击穿强度高于聚丙烯层压纸,利用孔径较小的聚四氟乙烯滤纸制成的低介损复合绝缘具有最强的抗击穿能力。在交流电压下,固体绝缘的失效主要是由局部放电引起绝缘劣化并最终造成的击穿导致,局部放电的能量会以声、光、电、磁、热的方式释放,导致热积累和绝缘材料中分子链的断裂。聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘材料表现出更强的抗局部放电能力,因此具有更高的击穿强度。另一方面,聚四氟乙烯的分子链需要更高的能量积累才能发生断裂,在局部放电影响下的绝缘劣化过程更加缓慢,因此将聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘材料应用在交流高温超导电缆中时,电缆具有更高的绝缘可靠性。

3 结 论

本文介绍了一种新型复合绝缘材料的制作方法,通过用聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘材料代替聚丙烯层压纸用作交流高温超导器件的绝缘材料,可使高温超导电缆运行中的介电损耗降低至约一半。由孔径较小的聚四氟乙烯滤纸制成的低介损复合绝缘材料具有更优异的抗局部放电性能和抗绝缘击穿性能。

与日本学者所做的低介损特卫强/聚乙烯复合绝缘材料相比,聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘材料的介电损耗更

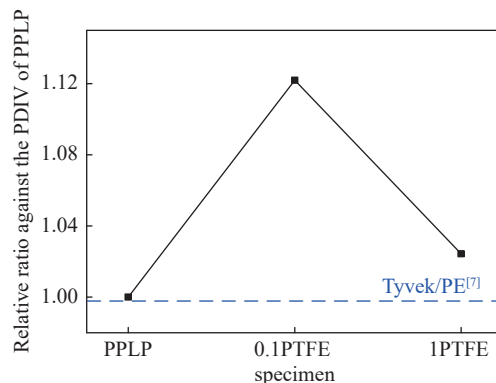


Fig. 4 Comparison of the partial discharge inception voltage between PPLP and PTFE/PP in LN₂

图4 液氮中聚丙烯层压纸和聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘的局部放电起始电压对比

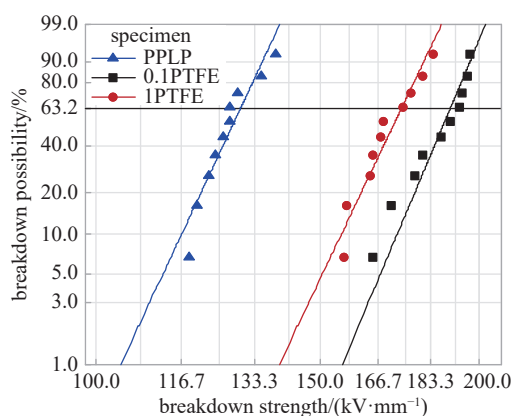


Fig. 6 Breakdown strength of PPLP and PTFE/PP in LN₂

图6 液氮中聚丙烯层压纸和聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘的击穿强度

高,但仍低于聚丙烯层压纸。特卫强/聚乙烯复合绝缘材料的局部放电起始电压与聚丙烯层压纸相同,而使用聚四氟乙烯/聚丙烯复合绝缘材料可以在降低接电损耗的同时提高绝缘局部放电起始电压和击穿强度,这有助于在绝缘厚度设计参数不变的情况下提高超导电缆的传输能力。

参考文献:

- [1] Jin Jianxun, Tang Yuejin, Xiao Xianrong, et al. HTS power devices and systems: principles, characteristics, performance, and efficiency[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26: 3800526.
- [2] Du Boxue, Xing Yunqi, Jin Jianxun, et al. Surface potential behavior of direct-fluorinated PPLP under quench condition[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26: 4805005.
- [3] Hayakawa N, Ishida K, Matsuoka T, et al. Electrical insulation characteristics and mechanisms of low dielectric loss materials for high-voltage HTS cables[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, 27: 4800904.
- [4] Du Boxue, Xing Yunqi. Surface potential behavior of fluorinated polyimide film under low temperature[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, 23(1): 121-128.
- [5] Hayakawa N, Nishimachi S, Kojima H, et al. Size effect on breakdown strength in sub-cooled liquid nitrogen for superconducting power apparatus[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(5): 2565-571.
- [6] Du Boxue, Zhu Lewei, Han Tao. Effect of low temperature on electrical treeing of polypropylene with repetitive pulse voltage[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, 23(4): 1915-1923.
- [7] Hayakawa N, Nishimachi S, Maruyama O, et al. A novel electrical insulating material for 275 kV high-voltage HTS cable with low dielectric loss[J]. *Journal of Physics:Conference Series*, 2014, 507: 032021.
- [8] Du Boxue, Xu Hang, Li Jin. Effects of mechanical stretching on space charge behaviors of PP/POE blend for HVDC cables[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24(3): 1438-1445.
- [9] Lee B W, Choi W, Choi Y M, et al. Comparison between PD inception voltage and BD voltage of PPLP in LN₂ considering HTS cable insulation[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, 23: 5402104.