

温度对换流阀高压直流电容器用 BOPP 薄膜基础电气性能的影响

佟宇晶, 陈 庚, 赵子轩, 刘 馨, 王 璁, 屠幼萍

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘 要: 高压直流电容器是新型电力系统关键装备换流阀的核心部件之一, 在运行中承受直流叠加谐波与高温的共同作用, 电容器关键材料双向拉伸聚丙烯(biaxially-oriented polypropylene, BOPP)薄膜的电气性能能否满足严苛的运行工况是其能否实现国产化的关键。该文面向直流电容器用 5.8 μm BOPP 薄膜, 开展温度对 BOPP 薄膜击穿、介电、电导基础电气性能的影响规律研究。结果表明, 随着温度的上升, 不同种类 BOPP 薄膜的击穿性能下降, 当电容器运行温度为 70 $^{\circ}\text{C}$ 、120 $^{\circ}\text{C}$ 时, 击穿场强最高可分别下降 16.1%、32.3%。对于电导特性, 电导率随着温度升高而下降, 并在 60~70 $^{\circ}\text{C}$ 时存在显著下降拐点。所研究的 4 种 BOPP 的介电常数随温度的上升有小幅下降, 而介损随温度的上升均有上升趋势。其中, 70 $^{\circ}\text{C}$ 和 90 $^{\circ}\text{C}$ 分别是 BOPP 薄膜电导率和介质损耗上升的临界温度, 在换流阀等高温应用场景下考核介质薄膜绝缘性能时需要重点关注。BOPP 薄膜的热稳定性可能是其高温下绝缘性能变化的关键。所得结果可为高压直流电容器用 BOPP 薄膜国产化研制提供参考。

关键词: 换流阀高压直流电容器; BOPP; 交直流叠加电压; 击穿特性; 介电特性

Effect of Temperature on the Basic Electrical Properties of BOPP Film for High Voltage DC-link Capacitors in Converter Valves

TONG Yujing, CHEN Geng, ZHAO Zixuan, LIU Xin, WANG Cong, TU Youping

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(North China Electric Power University),
Beijing 102206, China)

Abstract: The high-voltage DC capacitor is one of the core components of the converter valve and a key device in new power system, and it bears the combined effects of DC voltage superimposed with harmonics and high temperature during operation. Whether the electrical properties of biaxially oriented polypropylene(BOPP) film, a key capacitor material, can meet these harsh operating conditions is critical for its domestic production. This paper investigates the influences of temperature on the breakdown, dielectric, and conductivity properties of 5.8 μm BOPP film for DC capacitors. Results show that the breakdown strength of all tested BOPP film types declines with rising temperature, with maximum reductions reaching 16.1% at 70 $^{\circ}\text{C}$ and 32.3% at 120 $^{\circ}\text{C}$. The conductivity characteristics of all types show a decreasing trend, and a notable inflection point occurs at 60~70 $^{\circ}\text{C}$ where the drop accelerates. The dielectric constants of the four BOPP films decrease slightly with the increase of temperature, while dielectric loss increases. Specifically, 70 $^{\circ}\text{C}$ and 90 $^{\circ}\text{C}$ serve as the critical threshold temperatures for the increase in conductivity and dielectric loss of BOPP films, respectively. These critical temperatures require particular attention when evaluating the insulation performance of dielectric film in high-temperature application scenarios such as converter valves. The thermal stability of BOPP films may be the determining factor for their insulation performance variations under high temperatures. The obtained results can provide references for the domestic research and development of BOPP film for high-voltage DC-link capacitors.

Key words: high voltage DC-link capacitors in converter valves; BOPP; AC and DC superimposed voltage; breakdown characteristics; dielectric properties

0 引言

换流阀是柔性直流输电系统的关键组成部分, 作为其核心设备的直流支撑电容器, 主要承担着支撑电压、滤除谐波等重要作用^[1-2]。相比其他类型电力电容器, 换流阀支撑电容器的主绝缘除承受直流叠加谐波的电场作用外, 还处于高温状态下。换流阀内的大功率电力电子器件在工作时产生的功率损耗和电容器自身的发热会使得直流电容器的运行温度最高达到 85 °C, 短时温度甚至高达 105 °C, 但是聚丙烯薄膜材料能够长期承受的温度 <80 °C^[3-6]。因此, 温度对交直流叠加电压下双向拉伸聚丙烯(biaxially-oriented polypropylene, BOPP)薄膜电气特性的影响是其设计和制备的关键。

关于温度对聚丙烯薄膜电气性能的影响, 天津大学杜伯学教授团队研究了压制的不同 β 晶含量 PP (polypropylene, PP) 薄膜在 25~85 °C 下的击穿强度、介电常数与介电损耗, 得到了 PP 的微观结构参数及拉伸工艺对聚丙烯薄膜介电性能造成的影响^[7-8]。西安交通大学刘文凤教授团队研究了不同老化程度 BOPP 基膜的击穿性能, 认为损耗模量与薄膜绝缘性能有关^[9]。华中科技大学李化教授、林福昌教授团队研究了 0~70 °C BOPP 薄膜的保压性能^[10-11], 发现结晶度会影响不同温度下 BOPP 薄膜的保压性能。在交直流叠加电压方面, 英国南安普顿 George Chen 教授团队通过理论分析与仿真计算研究, 发现不同比例的交直流电压叠加与不同升压速率都会通过电荷行为进一步影响到 BOPP 薄膜击穿电压^[12]。中国电科院劳斯佳等和华北电力大学王子健等使用国标电极系统^[13]研究发现, 当温度从 20 °C 升高到 95 °C 时, 金属化膜和基膜直流击穿强度分别下降了 30% 和 31.12%, 且交直流叠加的电压形式导致击穿电压值下降^[14-15]。但鲜有学者关注到高温下交直流叠加电压对 BOPP 击穿性能的影响。换流阀高压直流电容器中实际运行温度可达 105 °C, 已有的 BOPP 薄膜绝缘性能受温度影响的研究范围较窄, 仍需进一步扩展温度的研究范围。此外, 随着新型电力系统的发展, 国产 BOPP 薄膜研发亟待突破, 已有研究对 BOPP 薄膜交直流叠加与温度耦合作用下的基础绝缘性能研究与评估仍有不足, BOPP 薄膜国产化问题尚未完全解决。

本文研究了换流阀高压直流电容器用 BOPP 薄膜 20~120 °C 范围内的击穿特性和 30~110 °C 范围内

的电导与介电特性, 并对不同粒料与成膜工艺的 BOPP 进行了实验研究, 分析了 BOPP 微观结构热稳定性与高温下绝缘性能的关联关系, 为应用于换流阀等高温环境下的 BOPP 薄膜绝缘性能评价方法提供参考。

1 试验平台与实验方案

选取不同粒料、成膜工艺的 4 种工业用 BOPP 薄膜, 且均从连续膜卷中进行取材。BOPP 薄膜实验温度范围涵盖材料热缩形变温度(85 °C)和短时可能达到的最高温度(105 °C)。

1.1 击穿场强测试

薄膜击穿场强试验平台如图 1 所示, 主要由信号发生器、功率放大器、示波器、试验电极、加热系统组成。信号发生器用以产生预设的电压信号如交直流升压信号等, 示波器用于测量薄膜的击穿电压并传输到控制与数据采集终端统计处理。外施温度由油循环加热系统提供, 可以使与 BOPP 薄膜接触的加热板表面温差控制在 1 °C 以内。由于实验对象为 5.8 μm BOPP 薄膜, 较其他常见的薄膜绝缘材料更薄, 因此专门设计了图 1 所示的铝箔击穿电极系统。其高压电极与地电极均为 6 μm 厚度退火铝箔, 有效电极区域为直径 2 cm 的圆形, 同时设计 8 cm 条形引线便于接线与绝缘隔离, 试样裁剪成边长 10 cm 方形, 按照图示结构 3 层布置, 可以有效防止沿面闪络; 柔软的退火铝箔电极可以更好地贴合试样, 降低电极与试样之间气隙层对电压分布与击穿的影响。击穿测试过程中, 直流分量以 100 V/s 的升压速率匀速上升, 交流分量频率选取 50~500 Hz 及其混频, 以贴近实际工况电压。

1.2 电导测试

薄膜的电导特性测试系统如图 2 所示。系统由直流稳压电源、KEITHLEY 6517B 静电计和适用于微米级薄膜的蒸镀铝电极系统组成。该系统可以施加最高 10 kV 直流电压, 测量介质薄膜在 30~110 °C

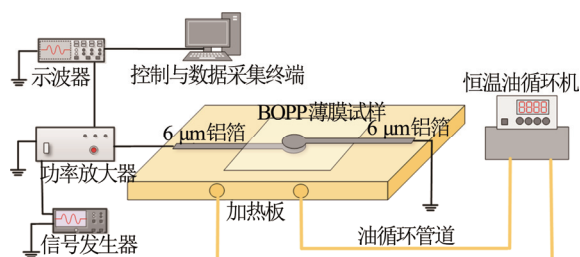


图 1 击穿试验平台

Fig.1 Breakdown test platform

温度下, 240 kV/mm 电场强度下的泄漏电流。

1.3 介电常数与介损测试

薄膜的介电常数与介损测试采用 Novocontrol Concept 80 宽频介电谱仪, 薄膜相对介电常数和介质损耗角正切值的频率测试范围为 10~10⁷ Hz。

2 实验结果

2.1 温度对击穿特性的影响规律

2.1.1 直流击穿特性

击穿场强采用威布尔分布统计并进行分析^[16]。以 50 次试验作为 1 组, 并对 50 次击穿实验结果采用威布尔统计方法进行统计, 即:

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right) \quad (1)$$

式中: $F(x)$ 为击穿概率; x 为击穿场强; α 为尺度参数, 表示击穿概率为 63.2% 时的击穿场强; β 为形状参数, 表示击穿场强的分布情况。

图 3 描述了典型工业用 BOPP 薄膜在 20~120 °C 温度范围内的击穿特性, 可以看出, 直流电压下, 随着温度的升高, BOPP 薄膜的击穿场强呈现出逐渐降低趋势, 其中, 20 °C 时击穿场强最高, 120 °C 时击穿场强最低。另一方面, 随着温度的升高, β 先升高后降低, 数据分散性先减小后增大。其中, 在 70 °C 时, β 为最大值, 即分散性最小。而在换流阀高压直流电容器运行可能达到的最高温度 105 °C 作用下, 分散性则最大, 比 70 °C 下的击穿分散性增大了约 50%。

图 4 展示了 4 种不同粒料及成膜工艺 BOPP 薄膜的击穿测试结果。结果表明, 尽管 4 种 BOPP 薄膜的击穿场强都随着温度的上升而下降, 但具体而言, 不同薄膜击穿场强随温度的变化规律表现出明显差异, 其中基膜 1 在所有温度范围内击穿场强均最高。20 °C 时, 基膜 1 击穿场强最高, 基膜 2 次之, 基膜 3 与基膜 2 接近, 基膜 4 击穿场强最低。然而, 85 °C 下基膜 4 的击穿场强显著高于基膜 2 和基膜 3, 但在 105 °C 下 4 种基膜均有明显下降, 其中基膜 1、2、3 相差不大, 基膜 4 明显低于另外 3 种基膜。当温度从 20 °C 升到 120 °C 时, 基膜 1 的击穿场强从 713.6 V/ μ m 下降到 497.4 V/ μ m, 降幅为 30.28%。而在 45 °C 及以上温度时, 基膜 3 的击穿场强均低于其他 3 种膜, 且当温度从 20 °C 升到 120 °C 时, 基膜 1 的击穿场强从 645.7 V/ μ m 下降到 436.9 V/ μ m, 降幅达 32.3%, 降幅在 4 种膜中最高。此外, 可以发

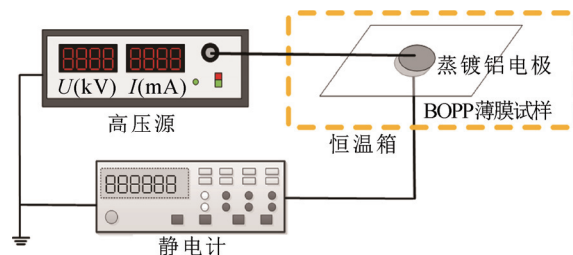


图 2 电导测试平台

Fig.2 Test platform for conductivity and dielectric breakdown

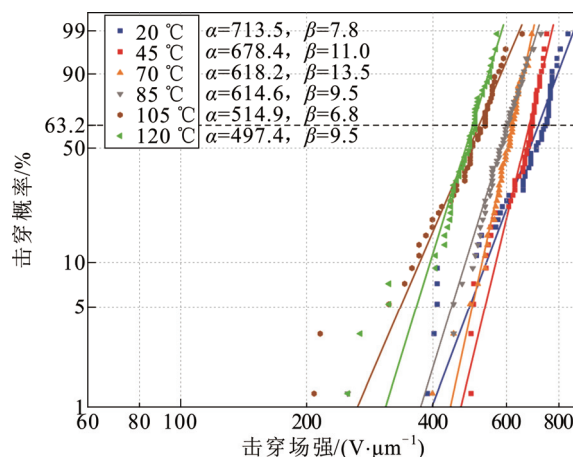


图 3 BOPP 薄膜在不同温度下的直流击穿特性

Fig.3 DC breakdown characteristics of BOPP films at different temperatures

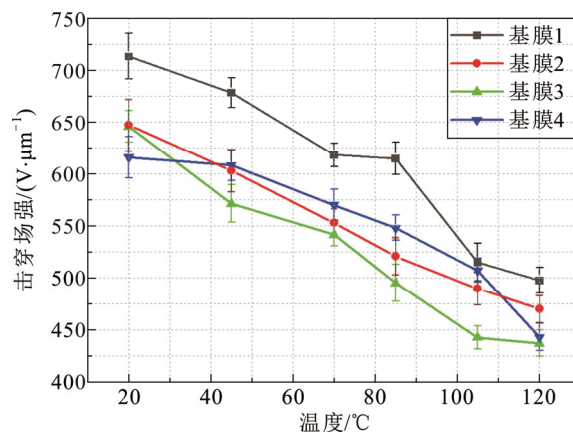


图 4 不同直流电压下 BOPP 薄膜击穿场强随温度的变化规律

Fig.4 Breakdown field strength of BOPP film varying with temperature under different DC voltages

现随着温度的提高, 4 种 BOPP 薄膜击穿场强的分散性均表现出先减小后增大的规律。

基膜 1 在不同温度下的击穿场强均为最高。值得注意的是, 常温下基膜 2 和基膜 3 的击穿场强大

于基膜 4, 但是在高温下基膜 4 的击穿场强反而高于基膜 2 和基膜 3, 因此, 不能从单一温度下的击穿场强大小来判断一种膜的耐高温性能。

此外, 不同膜的温度下降转折点不一样。图 5 描述了击穿场强随温度上升时, 不同温度下相较于 20 °C 击穿场强的下降率。可以看出, 随着温度的上升, 基膜 1 的击穿场强首先下降, 在 70~85 °C 之间趋于稳定, 在 105 °C 出现性能的大幅度下降, 温度转折点是 85 °C; 基膜 2 击穿场强下降较为均匀; 基膜 3 在 45 °C 就出现较大幅度下降, 在 70 °C 下降速率进一步加快, 在 105 °C 下击穿性能趋于稳定, 温度转折点是 70 °C; 基膜 4 在 45 °C 下击穿场强出现极小幅度下降, 在 45~105 °C 之间击穿场强匀速缓慢下降, 在 120 °C 才出现膜性能的大幅度下降, 温度转折点是 105 °C。

2.1.2 交直流击穿特性

图 6 描述了某交直流工程实际电压以及波形经傅里叶分解后频率与幅值的关系, 为模拟实际工况, 在其主要的电压波形分量下开展击穿测试。击穿测试中电压分量为逐渐升压的直流分量以及频率 50 Hz 幅值 200 V、频率 100 Hz 幅值 30 V、频率 500 Hz 幅值 4 V 3 种频次交流分量。不同电压形式中的交直流分量含量如表 1 所示。

图 7 描述了不同粒料及成膜工艺膜在 20 °C 下的交直流电压击穿特性, 可以看出, 在交直流电压下, 随着温度的升高, BOPP 薄膜的击穿场强呈现出下降趋势, 20 °C 下击穿场强最高, 120 °C 下击穿场强最低。另一方面, 随着温度的升高, β 有所降低, 表明 BOPP 直流击穿场强的分散性下降。

图 8 为 20 °C 时, 对直流击穿场强最高和最低的基膜 1、基膜 4 进行不同温度下的交直流击穿测试结果。可以发现, 2 种膜均在叠加交流分量后发生击穿场强下降的现象, 且叠加 10 倍频交流分量比叠加基频交流分量导致薄膜击穿场强下降更多。相同电压作用形式下, 温度越高击穿场强越低, 但不同温度下, 交直流击穿场强相对于直流击穿场强的降低程度不同。随着温度的升高, 基膜 1 在含有基频与 10 倍频交流分量的电压形式作用下, 交流分量导致的下降程度均先增高、后降低、再升高, 呈现不单调的变化趋势。温度没有显著放大交直流电压降低击穿场强的程度, 即高温对击穿场强的影响程度可能比谐波更大。

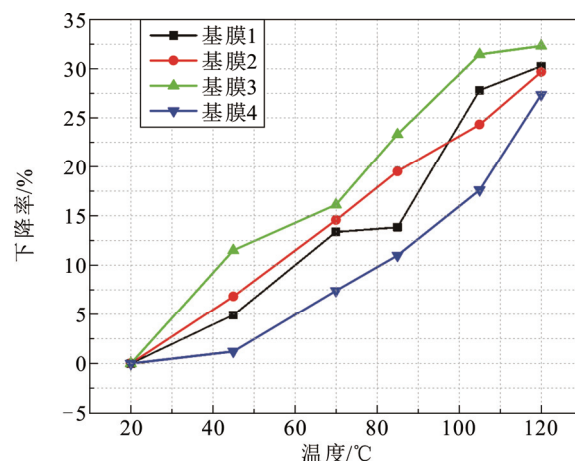
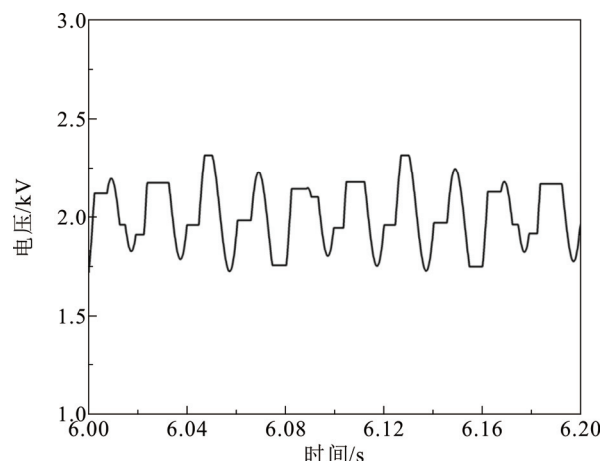
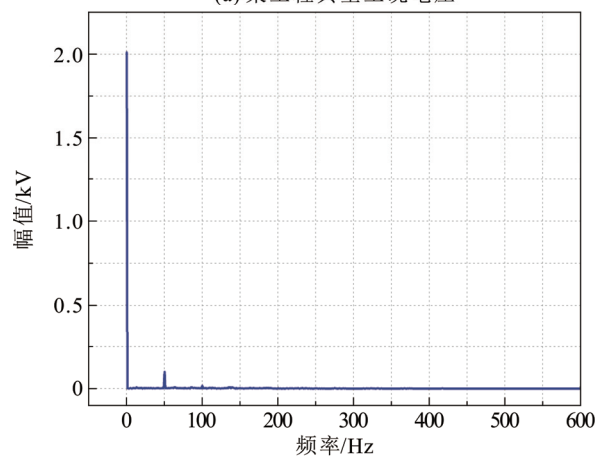


图 5 直流电压下 BOPP 薄膜击穿场强随温度的下降率
Fig.5 Decrease rate of breakdown field strength of BOPP thin films with temperature under DC voltage



(a) 某工程典型工况电压



(b) 工况电压频谱分析

图 6 工况电压及其傅里叶频谱分析

Fig.6 Operating voltage and its Fourier spectrum analysis

2.2 电导特性

图 9 为电场强度为 240 V/μm 时, 4 种 BOPP 薄膜电导率随温度的变化规律。可以发现, 4 种 BOPP

表 1 不同电压形式中的交直流分量含量

Table 1 Content of AC and DC components in different voltage forms				
电压形式 编号	直流分量 升压速率/ (V·s ⁻¹)	交流分量幅值/V		
		50 Hz	100 Hz	500 Hz
DC		—	—	—
DC+AC-1	100	200	—	—
DC+AC-2		200	30	4
DC+AC-3		—	—	200

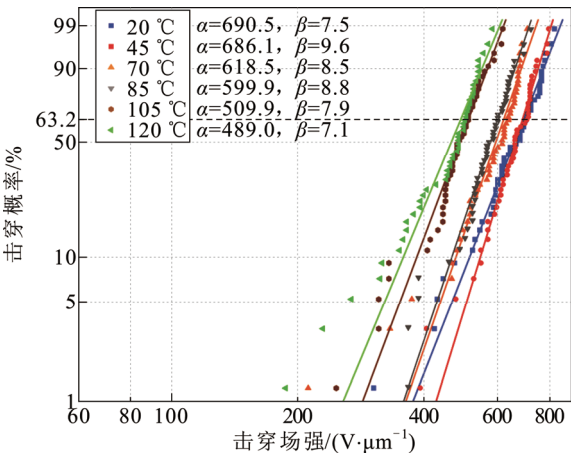


图 7 BOPP 薄膜在不同温度下的交直流电压击穿特性
Fig.7 AC and DC superimposed voltage breakdown characteristics of BOPP film at different temperatures

的电导率随温度上升均有升高，当温度>60℃时，均出现了电导率骤增的现象。其中，基膜 2 的骤增现象最弱，在电导特性上表现出相对较好的热稳定性。

图 10 描述了不同电场强度下 BOPP 薄膜电导率变化的临界温度。可以发现，当电场强度<80 V/μm 时，4 种基膜的临界温度相似。然而，随着场强的升高，电导率临界温度开始降低，不同膜的电导率已表现出差异，并呈现分段下降。当场强>120 V/μm 时，基膜 4 临界温度最低。此外，基膜 3 在 280 V/μm 时，临界温度骤降点较其他基膜出现的更早。当场强提高到 400 V/μm 时，基膜 1、基膜 3 和基膜 4 的临界温度再次趋同，而基膜 2 最高。

2.3 相对介电常数与介质损耗

图 11 对比了 4 种不同粒料-成膜工艺 BOPP 的相对介电常数和介质损耗角正切值。从相对介电常数的对比中可以看出，4 种 BOPP 薄膜的相对介电常数接近，均为 2.25 左右，随温度的上升有小幅下降，在 110℃时均>2.2。

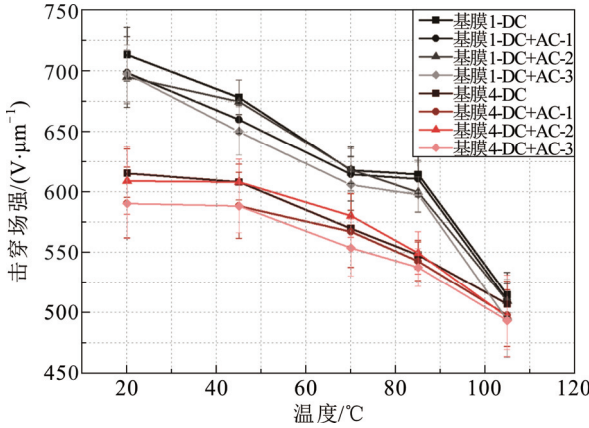


图 8 交直流电压下 BOPP 薄膜击穿场强随温度的变化规律
Fig.8 Breakdown field strength of the BOPP film varying with temperature under DC and AC superimposed voltage

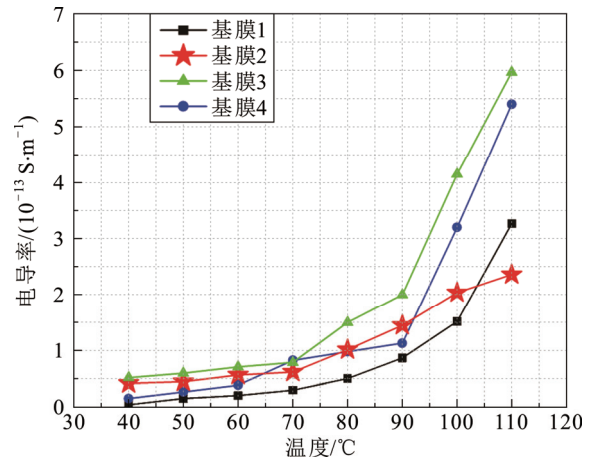


图 9 不同温度下 4 种 BOPP 薄膜的电导率
Fig.9 Conductivity of the four types of BOPP films at different temperatures

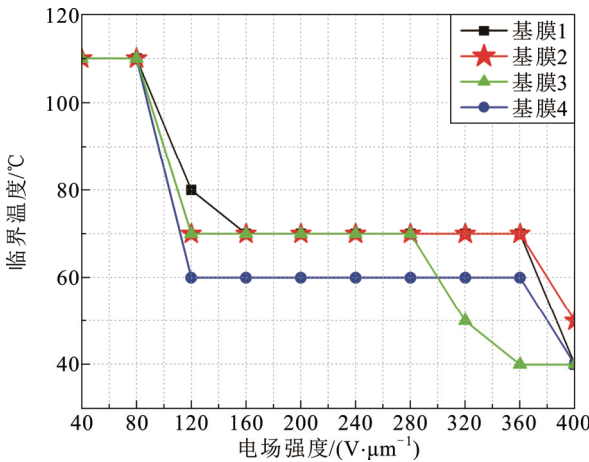


图 10 不同外施电场下 BOPP 薄膜电导率变化临界温度
Fig.10 Critical temperature of conductivity change of BOPP film under different external electric fields

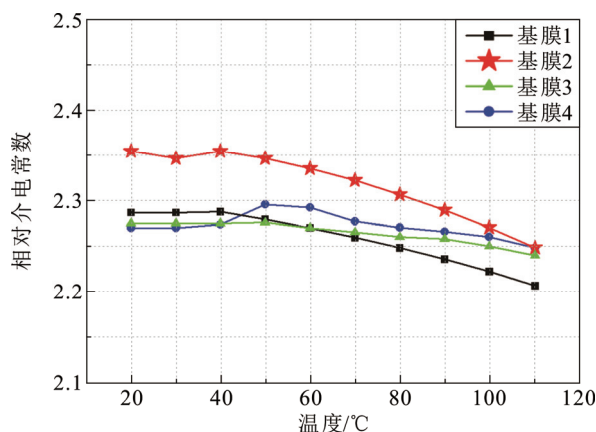


图 11 不同温度下 4 种 BOPP 薄膜的相对介电常数

Fig.11 Relative permittivity of the four types of BOPP films at different temperatures

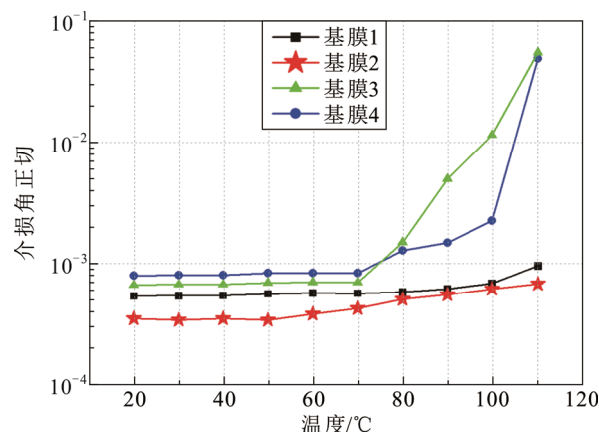


图 12 不同温度下 4 种 BOPP 薄膜的介损角正切

Fig.12 Dielectric loss tangent of the four types of BOPP films at different temperatures

图 12 描述了不同种类 BOPP 薄膜在 50 Hz 下的介损角正切, 通过对比分析可以看出, 4 种 BOPP 薄膜的介损随温度上升均有上升趋势, 在温度 $>80^{\circ}\text{C}$ 时介损的上升速度加快。此外, 不同种类 BOPP 之间的介损差距较大, 基膜 2 的介损是 4 种 BOPP 中最小的。

此外, 可以发现, 基膜 1、基膜 3 的介电特性在 $40\sim 100^{\circ}\text{C}$ 时差别较小, 在 110°C 时差别较大。2 者的相对介电常数均为 2.25 左右, 介质损耗和测量稳定性差距较大。 110°C 的介电特性测试可以明显区分不同种类的 BOPP 薄膜, 适合作为 BOPP 薄膜在高温下的绝缘特性评价方法。

3 讨论

综上所述, 温度上升会对 BOPP 薄膜的绝缘性能产生较大不利影响。已有研究表明, 温度升高会影响聚丙烯薄膜内的凝聚态结构和分子链运动, 导致薄膜绝缘性能下降^[17-21]。本文测试了 4 种 BOPP 薄膜的差示扫描量热(differential scanning calorimetry, DSC)曲线和热重分析(thermal gravimetric analysis, TGA)曲线, 以讨论 BOPP 薄膜凝聚态结构和分子链结构的温度敏感性与绝缘热稳定性之间的关系。

图 13、14 分别为 4 种 BOPP 薄膜的 DSC 和 TGA 测试曲线, 其中熔点已直接标记在图中, 基膜 1、基膜 2、基膜 3、基膜 4 的结晶度分别为 54.2%、49.7%、52.3%、47.1%。测试结果表明, 熔点、结晶度、热分解温度这 3 个指标均为基膜 1 > 基膜 2 > 基膜 4。指标越高的薄膜具有越好的热稳定性、越

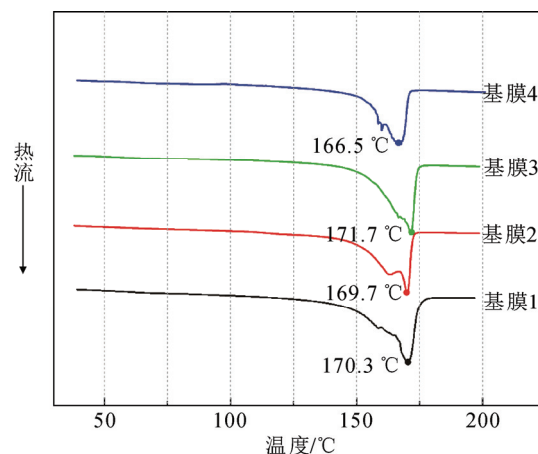


图 13 4 种 BOPP 薄膜的 DSC 测试结果

Fig.13 DSC test results of the four types of BOPP films

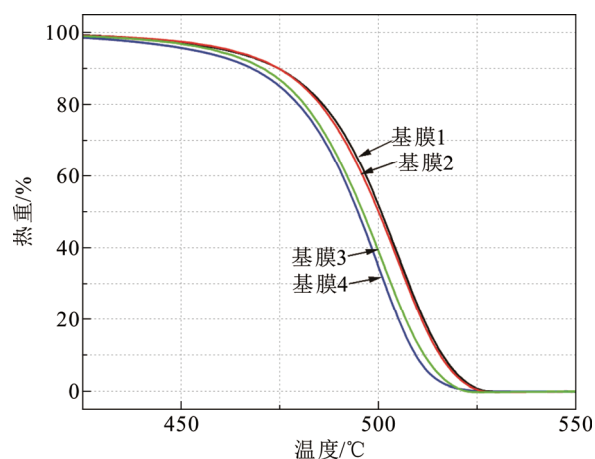


图 14 4 种 BOPP 薄膜的热失重曲线

Fig.14 TGA curves of the four types of BOPP films

低的温度敏感性, 与电导率的温度敏感性、介损的温度敏感性具有较好的对应关系。因此本文合理推测结晶度越高, 分子链排列越有序, 无定形区越少,

无定形区固有击穿场强较低, 进而导致薄膜击穿场强下降。但对照 4 种 BOPP 薄膜 DSC 测试结果的熔融曲线可以发现, 4 者熔融峰形状不同, 熔融过程有所不同。在 BOPP 薄膜制造过程中, 熔融挤出的 PP 材料中既有 α 晶也有 β 晶; 而在拉伸过程中, β 晶全部转化为 α 晶, 这一点在 XRD 测试中可以得到佐证^[22-23]。同样只含有 α 晶的 BOPP 薄膜却有着不同的熔程, 说明温度在作用于 BOPP 薄膜材料时, 材料的响应不仅受到晶型与结晶度的影响, 还与介观层面的片晶、取向结构等材料特性有关, 这种多尺度上的温度影响导致了基础电气参数受到温度影响过程的复杂性。

特别地, 基膜 3 的熔点为 171.7 °C, 是 4 种膜里最高的, 但绝缘性能却不是最优的。因此, 微观结构对绝缘性能的影响复杂, 且影响因素之间相互耦合, 相关机理仍需进一步深入研究。

4 结论

本文研究了 20~120 °C 范围内, 换流阀高压直流电容器用 BOPP 薄膜的击穿特性和 30~110 °C 范围内 BOPP 薄膜的电导和介电特性, 分析了 BOPP 微观结构热稳定性与高温下绝缘性能的关联关系, 得出的主要结论如下:

1) 当温度从 20 °C 升高到 120 °C 时, BOPP 薄膜的直流击穿场强下降, 降幅最高可达 32.3%。不同粒料及成膜工艺 BOPP 薄膜的击穿场强随温度的变化有相同的变化趋势。在交直流叠加电压作用下, BOPP 薄膜击穿场强的下降趋势与直流电压作用相似。

2) 随着温度的升高, BOPP 薄膜的电导率上升。当场强 ≤ 80 V/ μm 时, 4 种基膜的临界温度相似。然而, 当场强 > 80 V/ μm 时, 电导率临界温度开始降低, 粒料和成膜工艺对薄膜的电导率影响的差异性开始显现。当场强 > 120 V/ μm 时, 结晶度最低基膜(47.1%)临界温度最低。此外, 当场强为 280 V/ μm 时, 熔点最高的基膜(171.7 °C)临界温度骤降点较其他基膜出现的更早。可见温度对高场下薄膜性能的影响并不能用单一微观变量表征。

3) 4 种 BOPP 的相对介电常数接近, 均为 2.25 左右, 且随温度上升有小幅度的下降。从介质损耗角正切的对比中可以看出, 4 种 BOPP 的介损随温度的上升均有增大趋势, 在 80 °C 以上时介损的上升速度加快。其中, 结晶度最高的基膜(54.2%)介损

增长率转变点为 90 °C, 其他膜的转变点则为 70 °C。此外, 热分解温度较低的基膜的介损增长率高于热分解温度较高的基膜。这一现象表明, 结晶度和热分解温度对于薄膜的高温介损有显著影响。

4) 对于换流阀高压直流电容器用 BOPP 薄膜, 除常温下的电气性能考核外, 建议增加 70、90 °C 等电气性能转变敏感温度点的电气性能测试。

参考文献 References

- [1] 叶杰, 汤广福, 赵成勇. 多电压等级柔性直流电网建模与稳定性分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1433-1441.
YE Jie, TANG Guangfu, ZHAO Chengyong. Modeling and stability analysis for flexible DC power grid with multi-voltage levels[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1433-1441.
- [2] 马为民, 吴方劫, 杨一鸣, 等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2429-2439.
MA Weimin, WU Fangjie, YANG Yiming, et al. Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2429-2439.
- [3] 王华峰, 林志光, 张海峰, 等. ± 800 kV 特高压直流工程换流阀故障分析与优化设计方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 67-73.
WANG Huafeng, LIN Zhiguang, ZHANG Haifeng, et al. Fault analysis of ± 800 kV UHVDC transmission converter valve and optimal design method[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 67-73.
- [4] LAN L, WU J D, YIN Y, et al. Effect of temperature on space charge trapping and conduction in cross-linked polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(4): 1784-1791.
- [5] 李浩波, 李化, 张国豪, 等. 基于共轭梯度法的金属化薄膜电容器热点温度反演[J]. 高电压技术, 2024, 50(9): 4163-4170.
LI Haobo, LI Hua, ZHANG Guohao, et al. Hot-spot temperature inversion for metallized film capacitors based on conjugate gradient method[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(9): 4163-4170.
- [6] 杜伯学, 冉昭玉, 刘浩梁, 等. 干式直流电容器聚丙烯薄膜绝缘性能及其改进方法研究进展[J]. 电工技术学报, 2023, 38(5): 1363-1374.
DU Boxue, RAN Zhaoyu, LIU Haoliang, et al. Research progress of dielectric properties and improvement methods of polypropylene film for dry-type capacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(5): 1363-1374.
- [7] XV R R, DU B X, XIAO M, et al. Dielectric properties dependent on crystalline morphology of PP film for HVDC capacitors application[J]. Polymer, 2021, 213: 123204.
- [8] 邢照亮, 杜满丹, 杜伯学, 等. 微观结构及拉伸倍率对电容器聚丙烯薄膜介电性能的影响[J]. 高电压技术, 2024, 50(6): 2344-2353.
XING Zhaoliang, DU Xiaodan, DU Boxue, et al. Effect of micro-structure and stretching ratio on dielectric properties of polypropylene films for capacitors[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2344-2353.
- [9] 程璐, 李志元, 王镜然, 等. 高压直流电场与谐波耦合作用下金属化膜电容器失效研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8955-8964.
CHENG Lu, LI Zhiyuan, WANG Jingran, et al. Mechanism study on the failure of metalized film capacitor under HVDC field superimposed harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8955-8964.

- 8955-8964.
- [10] LI H, CHEN Y H, LIN F C, et al. Study on voltage maintaining performance of metallized film capacitors under high electric fields[C]//2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico: IEEE, 2011: 699-702.
- [11] 王雨橙, 李 化, 王哲豪, 等. 结晶度对金属化膜电容器耐压性能的影响[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3643-3650.
WANG Yucheng, LI Hua, WANG Zhehao, et al. Voltage maintaining performance of metallized film capacitors based on crystallinity regulation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3643-3650.
- [12] ZHANG S Y, PENG Z R, ZHOU C R, et al. Numerical analysis on space charge and AC-DC combined breakdown strength in polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(3): 826-834.
- [13] 劳斯佳, 何 樱, 唐 勇, 等. 交直流复合电压下温度和膜厚对金属化膜击穿特性影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 12-17.
LAO Sijia, HE Ying, TANG Yong, et al. Study on the influence of temperature and film thickness on breakdown characteristic of metallized films under AC-DC composite voltage[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 12-17.
- [14] 中国电器工业协会. 电气绝缘用薄膜 第2部分: 试验方法: GB/T 13542.2—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
China Electrical Equipment Industry Association. Film for electrical insulation—part 2: methods of test: GB/T 13542.2—2009[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2009.
- [15] WANG Z J, CUI C G, MA Y F. Experimental investigation on breakdown characteristics of metallized film capacitors under AC and DC superimposed voltage[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(2): 478-488.
- [16] Guide for the statistical analysis of electrical insulation breakdown data: IEC 62539-2007[S]. Geneva, Switzerland: IEC Central Office, 2007.
- [17] 王威望, 李盛涛. 工程固体电介质绝缘击穿研究现状及发展趋势[J]. 科学通报, 2020, 65(31): 3461-3474.
WANG Weiwang, LI Shengtao. Research status and development of insulation breakdown in engineering solid dielectrics[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(31): 3461-3474.
- [18] IEDA M, NAGAO M, HIKITA M. High-field conduction and breakdown in insulating polymers. Present situation and future prospects[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(5): 934-945.
- [19] ARTBAUER J. Electric strength of polymers[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1996, 29(2): 446-456.
- [20] SANDEN B, IIDSTAD E. DC electrical and mechanical characterisation of polypropylene film[C]//Proceedings of the 1998 IEEE 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics. Vasteras, Sweden: IEEE, 1998: 210-213.
- [21] RYTÖLUOTO I, LAHTI K, KARTTUNEN M, et al. Large-area dielectric breakdown performance of polymer films—part I: measurement method evaluation and statistical considerations on area-dependence[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(2): 689-700.
- [22] TAMURA S, TAKINO K, YAMADA T, et al. Crater formation mechanism on the surface of a biaxially oriented polypropylene film[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 126(S2): E501-E512.
- [23] RYTÖLUOTO I, GITSAS A, PASANEN S, et al. Effect of film structure and morphology on the dielectric breakdown characteristics of cast and biaxially oriented polypropylene films[J]. European Polymer Journal, 2017, 95: 606-624.



TONG Yujing
Ph.D. candidate



CHEN Geng
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

佟宇晶

1997—, 女, 博士生

主要从事 BOPP 薄膜绝缘性能方面的研究工作

E-mail: tyj@ncepu.edu.cn

陈 庚(通信作者)

1990—, 男, 博士, 副教授

主要从事高压绝缘技术及电介质介电特性的研究工作

E-mail: gengchen@ncepu.edu.cn

收稿日期 2024-10-14 修回日期 2025-04-11 编辑 程子丰