

电容器用聚丙烯薄膜击穿场强测试方法及其结果分析

苏晓辉^{1,2}, 李 化^{1,2,3}, 许宇帆^{1,2}, 张桐玮^{1,2}, 卢 睿^{1,2}, 林福昌^{1,2,3}

(1. 电能高密度转换全国重点实验室(华中科技大学) 湖北 武汉 430074; 2. 电气与电子工程学院 湖北 武汉 430074; 3. 脉冲功率技术教育部重点实验室 湖北 武汉 430074)

摘要: 击穿场强是评价电容器用聚丙烯薄膜绝缘性能的关键指标,但其测试结果不仅取决于试样自身性能,而且受测试方法影响显著。为实现国产聚丙烯薄膜性能的对比迭代并与进口产品对标,必须选取一种可反映客观性能的击穿场强测试方法。针对这一需求,本文以国产电容器用聚丙烯薄膜为对象,开展了不同击穿测试方法的对比研究。通过改变测试电极结构等相关试验条件,获得了不同方法下薄膜击穿场强数据,并结合统计分析方法对测试结果进行比较。结果表明,不同测试方法所得击穿场强存在显著差异。综合考虑测试准确性、重复性、操作简便性和工程推广性,本文建议采用五十点电极方法作为电容器用聚丙烯薄膜击穿场强评价的推荐方法。研究结果可为国产聚丙烯薄膜质量评价、不同批次材料性能比较以及与进口薄膜产品的对标测试提供参考。

关键词: 金属化膜电容器;双向拉伸聚丙烯薄膜;进口替代;击穿场强;测试方法

Test Method and Result Analysis of Breakdown Strength for Capacitor-Grade Polypropylene Film

Su Xiaohui^{1,2}, Li Hua^{1,2,3}, Xu Yufan^{1,2}, Zhang Tongwei^{1,2}, Lu Rui^{1,2}, Lin Fuchang^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of High Density Electrical Energy Conversion (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Wuhan 430074, Hubei; 3. Key Laboratory of Pulse Power Technology (Ministry of Education), Wuhan 430074, Hubei)

Abstract: Breakdown strength is a key indicator for evaluating the insulation performance of polypropylene films used in capacitors. However, the results are not only determined by the intrinsic properties of material, but are also significantly affected by the testing method. To enable iterative performance comparison of domestic polypropylene films and objective benchmarking against imported products, it is necessary to select a breakdown strength test method that can accurately reflect the material performance. This paper conducts a comparative study of different testing methods using domestic polypropylene films. By varying the electrode configuration and other relevant experimental conditions, breakdown strength data of the films under different methods were obtained. Statistical analysis was then performed to compare the test results. The results show that the breakdown strength values obtained by different testing methods differ significantly. Considering testing accuracy, repeatability, operational simplicity and engineering applicability, this paper recommends the fifty-point electrode method as the preferred method for evaluating the breakdown strength of polypropylene films for capacitors. The results provide a reference for quality evaluation of domestic polypropylene films, performance comparison among different batches, and benchmarking tests against imported film products.

Key words: Metallized film capacitor; Biaxially oriented polypropylene film; Import substitution; Breakdown strength; Test method

0 引言

金属化膜电容器具有损耗低、可靠性高等优点,已广泛应用于电力系统、轨道交通、新能源装备和脉冲功率等领域^{[1][2]}。双向拉伸聚丙烯薄膜是金属化膜电容器的核心介质材料,其介电性能直接决定电容器的储能密度、运行可靠性和服役寿命等关键指标。长期以来,高端电容器用聚丙烯薄膜在一定程度上依赖进口。因此,推动电容器用聚丙烯薄膜国产化,实现国产薄膜与国外先进产品的性能对标和进口替代,具有重要的工程意义和产业价值。

击穿场强是评价聚丙烯薄膜性能的关键指标。对于电容器用聚丙烯薄膜而言,较高的击穿场强意味着材料能够承受更高的工作电场,有利于提升电容器的设计场强和储能密度。因此,准确评价国产聚丙烯薄膜的击穿场强,并判断其与进口产品之间的性能差距,是开展材料质量评价、产品选型和工程应用验证的重要基础。

然而,击穿场强并非仅由材料本征性能决定,其测试结果与测试方法密切相关。测试面积、升压速率、电极结构与表面状态以及是否采用油浴等因素,均可能改变电极间电场分布、薄膜缺陷暴露概率和预击穿

发展过程,从而导致测得的击穿场强存在差异。Laihonen 等对电容器级薄膜开展直流击穿试验,发现随测试电极面积增大,Weibull 特征击穿强度呈下降趋势,以聚丙烯薄膜为例,电极面积由 0.045 cm^2 增加至 9.3 cm^2 时,特征击穿强度由 $781\text{ V}/\mu\text{m}$ 降低至 $667\text{ V}/\mu\text{m}$ ^{[3][4]}。Camalov 等对单层 XLPE 试样开展工频击穿试验,结果显示,当升压速率由 500 V/s 提高至 3000 V/s 时,过氧化物交联 XLPE 和硅烷交联 XLPE 的平均击穿强度分别提高约 17.2% 和 12.6% ^[5]。Akin 和 Arikian 则通过比较不同电极结构下固体绝缘材料的击穿行为发现,电极结构会通过改变电极-材料接触面积和电场增强因子影响击穿特性;以 PET 为例,相较于圆柱-圆柱电极,针尖-圆柱电极下计算得到的特征击穿强度由 75.3 kV/mm 增加至 106.3 kV/mm ^[6]。Wetz 等研究了电极表面粗糙度对水介质脉冲击穿特性的影响,发现当不锈钢电极表面粗糙度 R_a 由 $0.26\text{ }\mu\text{m}$ 提高至 $1.96\text{ }\mu\text{m}$ 时,水介质耐受场强约降低 20% ,其原因在于粗糙表面的微突起会诱发局部电场增强并促进击穿发生^[7]。上述研究表明,击穿测试结果对试验条件具有明显敏感性,在进行不同材料或不同来源产品的性能比较时,必须充分考虑测试方法差异带来的影响。

目前,国外标杆产品手册中给出的击穿性能数据、国内行业中常用的测试方法以及最新标准中规定的测试条件并不完全一致。若测试方法不统一,不同国产薄膜之间的击穿性能难以进行客观比较;若未明确不同方法所得结果之间的差异及其原因,直接将国产薄膜实测结果与进口产品手册数据进行横向对比,将导致对材料性能水平的误判。因此,针对电容器用聚丙烯薄膜,有必要系统开展不同击穿测试方法的对比研究,明确不同测试条件下击穿场强结果的差异规律,并建立一种准确、简便且易于推广的击穿场强评价方法。

本文以国产电容器用聚丙烯薄膜为研究对象,采用不同击穿测试方法对其击穿场强进行测试,系统比较测试方法对击穿结果的影响规律,目的为建立适用于电容器用聚丙烯薄膜的击穿性能评价方法,而非预测薄膜卷绕形成电容器后的耐电强度。以此为导向,考虑到测试效率、数据稳定性和工程适用性,建议采用五十点电极方法作为适用于电容器用聚丙烯薄膜质量评价和性能对标的击穿场强测试方法。研究结果可为国产聚丙烯薄膜与进口产品的性能对比、测试方法统一以及材料工程化应用评价提供参考。

1 击穿场强标准测试方法

用于击穿场强测试的电极结构、电极尺寸等在大量研究中均有出现,通常各不相同。考虑到工业应用中的规范性,本文所参考的方法主要来源于各项 GB/T 国家标准中所推荐的方法。

1.1 击穿场强测试方法相关国标

目前在国内,适用于薄膜击穿场强测试的相关标准包括 GB/T 13542.2-2021《电气绝缘用薄膜 第2部分:试验方法》、GB/T 1408.1-2016《绝缘材料电气强度试验方法 第1部分:工频下试验》、GB/T 1408.2-2016《绝缘材料电气强度试验方法第2部分:对应用直流电压试验的附加要求》、GB/T 13542.2-2009《电气绝缘用薄膜 第2部分:试验方法》等^[8-11]。

在相关标准中,击穿场强方法众多,譬如将薄膜卷绕后进行测量的模型电容器方法、五十点电极方法等,不同方法中试电极形状可采用对称、非对称型,试验环境可以在油或空气中进行,下面选取其中典型方法进行陈述。

1.1.1 采用金属电极的测试方法

采用金属电极的各类测试方法参考 GB/T 13542.2-2021《电气绝缘用薄膜 第2部分:试验方法》、GB/T 1408.1-2016《绝缘材料电气强度试验方法 第1部分:工频下试验》、GB/T 1408.2-2016《绝缘材料电气强度试验方法第2部分:对应用直流电压试验的附加要求》的规定进行。

该类方法可采用多种金属电极结构,例如上电极直径为 25 mm 和下电极直径为 75 mm 金属电极组合、上电极直径为 20 mm 的球形电极与上电极直径为 25 mm 的金属板组合,或上下电极直径均为 6 mm 的金属电极组合。试验中应保持电极表面清洁、光滑,避免电极表面污染、划伤或局部缺陷对击穿结果造成附加影响。

试验时,将片状聚丙烯薄膜试样平整放置于上下金属电极之间,使试样完全覆盖有效电极区域,并保证

电极与薄膜表面充分接触。根据试验需要,测试可在空气或变压器油中进行。试验电压采用连续快速升压方式施加,升压速率应尽量选取 100V/s、200V/s、500V/s、1000V/s、2000V/s、5000V/s,直至试样发生击穿。

1.1.2 五十点电极方法

采用的五十点电极方法参考 GB/T 13542.2—2009《电气绝缘用薄膜 第2部分:试验方法》中 18.2.2 的规定进行。

试验时,尽量取不小于 450 mm × 650 mm 的长方形聚丙烯薄膜试样两张;当薄膜宽度小于 450 mm 时,可取若干张试样测试。试样应保持清洁、平整、无折皱和无损伤,以避免试样表面缺陷或机械损伤对击穿结果产生影响。

该方法采用柱形金属电极与铝箔下电极组成测试电极系统。上电极为黄铜柱形电极,直径为 25 mm,倒角半径为 2.5 mm,高度为 120 mm,工作面表面粗糙度 R_a 小于 1.25 μm 。在试验平台上铺设一张厚度约为 3 mm 的橡皮,橡皮邵氏硬度为 60 度~70 度,并在橡皮上铺设一张退火铝箔作为下电极。上下电极工作面应保持平整、光滑、无伤痕,避免电极表面状态对局部电场分布和击穿结果造成干扰。

试验采用单层试样进行,将试样平整放置于上下电极之间,并采用连续升压法施加直流电压。升压速率控制在 0.2 kV/s~1.0 kV/s 范围内。

1.1.3 双铝箔平板电极方法

采用的双铝箔平板电极方法参考 GB/T 13542.2—2021《电气绝缘用薄膜 第2部分:试验方法》中 21.3 的规定进行。

试验时,将尺寸为 10 cm × 10 cm 的聚丙烯薄膜试样夹置于上下铝箔之间,并整体放置在导电平板电极上。铝箔尺寸为 5 cm × 5 cm,厚度为 12 μm ,试验时铝箔哑光面应与薄膜表面接触,以保证电极与薄膜之间形成较稳定的接触状态。在上层铝箔上放置带圆边的高压电极,高压电极质量为 0.2 kg,其与铝箔之间的接触面积为 7 cm²。下方导电平板作为接地电极,平板表面应保持抛光和清洁,以避免因平板划伤、毛刺或局部缺陷诱发异常击穿。

试验过程中,向高压电极施加直流斜坡电压,升压速率控制在 100 V/s~400 V/s 范围内。当施加斜坡电压过程中首次检测到击穿电流时,对应电压定义为试样的击穿电压。试验回路中应设置限流电阻,以限制击穿瞬间的故障电流并保护平板电极表面;同时,采用电流敏感中断装置在检测到击穿后迅速切断外加电压。每次击穿试验后,应更换新的铝箔,以减少前一次击穿造成的电极烧蚀、残留污染或局部损伤对后续测试结果的影响。

1.1.4 模型电容器方法(元件法)

模型电容器方法可参考 GB/T 13542.2—2021《电气绝缘用薄膜 第2部分:试验方法》和 GB/T 13542.2—2009《电气绝缘用薄膜 第2部分:试验方法》的规定进行。该方法通过将试样薄膜卷绕成模型电容器元件,再对元件进行直流击穿试验。

试验装置包括直流击穿试验仪和卷制机。直流击穿试验仪输出电压应在 0~15 kV 范围内均匀可调,在大于 50% 击穿电压的电压范围内,纹波系数不大于 2%,试验电压中不应有超过 1% 施加电压的暂态或其他波动。每个电容器元件经受充电电流为 100 μA ± 20 μA 的直流升压试验。卷制机应能够卷绕模型电容器元件,并对薄膜施加 2.5 N ± 0.5 N 的卷绕张力。试样为无绝缘管芯的模型电容器元件,介质为单层被试薄膜,元件电容量为 0.5 μF ± 0.1 μF 。制样时,在被试薄膜卷上分切宽度为 60 mm~80 mm 的薄膜卷两卷,并将厚度约为 7 μm 的退火铝箔分切成 40 mm~70 mm 宽的铝箔卷两卷。随后将薄膜卷和铝箔卷安装在卷制机上,并调整其相对位置,使边缘留量按预期击穿电压每千伏 1 mm 设置。在直径约为 20 mm 的芯轴上卷绕元件,卷绕完成后从芯轴上取下,但不压扁,作为一个试样。

试验时,将模型电容器元件两边突出的铝箔电极分别连接至击穿试验仪的高压电极和接地电极。采用连续升压法从零开始升高电压,升压速率为 200 V/s。直至试样发生击穿。

模型电容器法涉及薄膜分切、铝箔分切、卷绕张力控制、边缘留量调整、元件电容量控制和电极引出等多个制样环节,操作过程极为复杂,且易引入较多人为因素,导致实测结果分散性较大。因此,本文不建议

将模型电容器法作为电容器用聚丙烯薄膜击穿场强的常规评价方法。

1.2 击穿场强测试方法相关国际标准

目前,国际上相关击穿场强测试标准主要包括 IEC 60243 和 IEC 60674 标准体系等^[12-14]。其中,IEC 60243-1:2013 和 IEC 60243-2:2013 分别规定工频和直流电气强度试验的通用要求,IEC 60674-2:2016 规定电气用塑料薄膜的具体试验方法。部分国家和地区据此制定了相应标准,例如,日本 JIS C 2151:2019 修改采用 IEC 60674-2:2016,德国 DIN EN 60674-2(VDE 0345-2):2020-02 采用 IEC 60674-2:2016 及其勘误和 2019 年修正案^[15-16]。我国 GB/T 1408.1—2016 和 GB/T 1408.2—2016 分别等同采用 IEC 60243-1:2013 和 IEC 60243-2:2013,GB/T 13542.2—2021 则修改采用 IEC 60674-2:2019。

总体来看,国标与 IEC 标准规定的击穿场强测试方法基本对应,在电极系统、试验电压、升压方式、击穿判定和结果表示等方面总体一致。例如,在具体测试方法方面,IEC 60674-2:2019 规定了三类薄膜击穿场强试验,分别与 GB/T 13542.2—2021 第 21.1、21.2 和 21.3 条对应。相比之下,主要差异在于,GB/T 13542.2—2021 进一步细化了模型电容器直流试验的试验装置、试样制备、试验程序和结果处理,但未改变该方法的基本原理。因此,就薄膜击穿场强测试而言,我国标准与 IEC 标准具有较好的一致性。

1.3 国际标杆产品测试方法

为了对标国际先进产品并实现进口替代,本文对多家电容器用双向拉伸聚丙烯薄膜先进厂商的标杆产品进行了调研,包括 Tervakoski、Toray、Treofan。调研结果显示,相关产品均未明确列出所采用的具体标准版本和试验方法,且仅有部分产品给出了标称值,导致不同产品间击穿场强数据的可比性存在不确定性。因此建议对进口和国产薄膜进行实测对比,而非直接采用产品手册数值。具体情况如下:

(1)Tervakoski 产品手册中标注的击穿场强范围为 250~550 V/ μm ,对应厚度为 6~17.8 μm ,测试面积为 2 m²,但其具体测试步骤、电极结构、升压方式及数据处理方法未公开^[12]。

(2)Toray 未公开完整的产品击穿性能信息,其测试参考标准为 JIS C 2151—2019,该标准来源于 IEC 60674 体系,但产品资料中未进一步说明具体测试方法^[14]。

(3)Treofan 未公开完整的产品击穿性能信息与相关测试方法。

由上述可知,部分国际先进产品手册中给出的击穿场强数据虽然具有重要参考价值,但测试标准版本、试验条件、电极结构、测试面积和数据处理方式等信息披露不完整。若直接将国产薄膜实测结果与进口产品手册数据进行横向比较,可能导致对材料性能水平的误判。因此,有必要建立一种条件明确、操作简便、重复性较好且适用于工程评价的击穿场强测试方法,直接对国产和进口薄膜进行实测对比,从而实现质量评价、批次比较以及与进口产品的对标分析。

2 试验方法与装置

本文采用了具有不同电极结构的多种方法对薄膜击穿性能进行了实测对比,重点分析了电极结构对击穿场强的影响。

2.1 试验样品

试验样品选用由国产聚丙烯粒料拉伸所得的国产双向拉伸聚丙烯薄膜,厚度为 5.2 μm 。

2.2 试验回路

金属棒-棒电极方法、金属球-柱电极方法、金属柱-板电极方法的测试电路原理图均可用图 1 表示。在上述三种测试方法中,测试电极均浸入在绝缘油中进行测试。五十点电极方法与双铝箔平板电极方法的原理图与图 1 类似,测试环境为空气。

试验时对试样施加直流电压,升压速率为 200 V/s。

2.3 电极结构

依据相关标准,不同试验方法中采用了五种电极结构,分别为金属棒-棒电极、金属球-柱电极、金属柱-板电极、双铝箔平板电极以及金属柱-铝箔电极,具体的参数如表 1 所示,具体结构如图 2-3 所示。

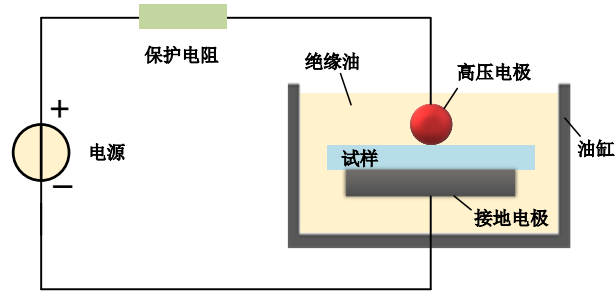


图 1 击穿场强测试示意图

Fig. 1 Schematic diagram of breakdown strength experiment

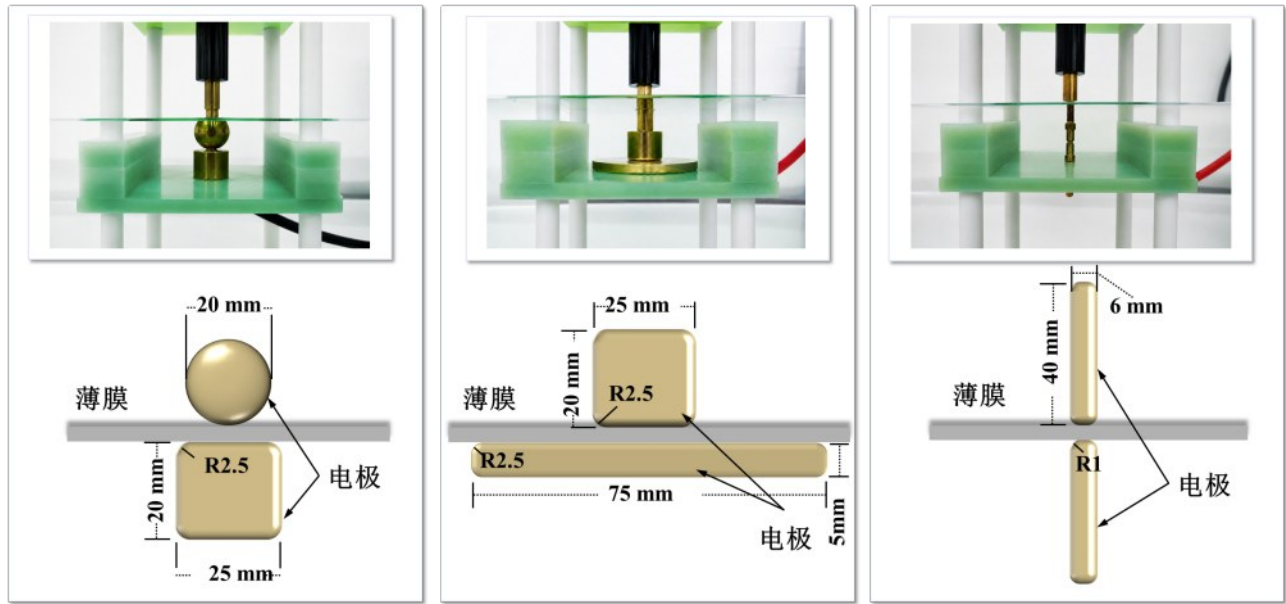


图 2 金属球-柱、柱-板、棒-棒电极方法装置实物及尺寸图

Fig. 2 Photograph and dimensional schematic of electrode configurations (metal sphere - cylinder, cylinder - plate and rod - rod electrode method)

3 结果与讨论

3.1 Weibull 分布所得的击穿场强

使用双参数 Weibull 分布对每种测试方法的击穿数据进行拟合。双参数 Weibull 分布的累积分布函数 (CDF) 的拟合公式如公式(1)所示, 它表示当施加在样件上的场强 $\leq E$ 时, 样件发生击穿失效的累积总概率。双参数 Weibull 分布的概率密度函数 (PDF) 的拟合公式如公式(2)所示, 它表示单位电压区间内样件发生击穿的概率密度。

$$F(E) = 1 - e^{-\left(\frac{E}{a}\right)^\beta} \quad (1)$$

$$f(E) = \frac{\beta}{a} \left(\frac{E}{a}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{E}{a}\right)^\beta} \quad (2)$$

式中, a 为尺度参数, 也称特征参数, 表示击穿概率为 63.2% 时对应的特征击穿场强 $E_{b63.2\%}$; β 为形状参数, 表示击穿场强的分散性, β 值越大, 击穿场强分布越集中。

不同方法中击穿场强的双参数 Weibull 拟合结果如图 4 和图 5 所示, 分别显示了击穿场强的累积分布函数和概率密度函数。

由图可知, 五种测试方法的击穿场强均能较好地符合 Weibull 分布, 累积分布函数拟合优度为 0.965~0.990。

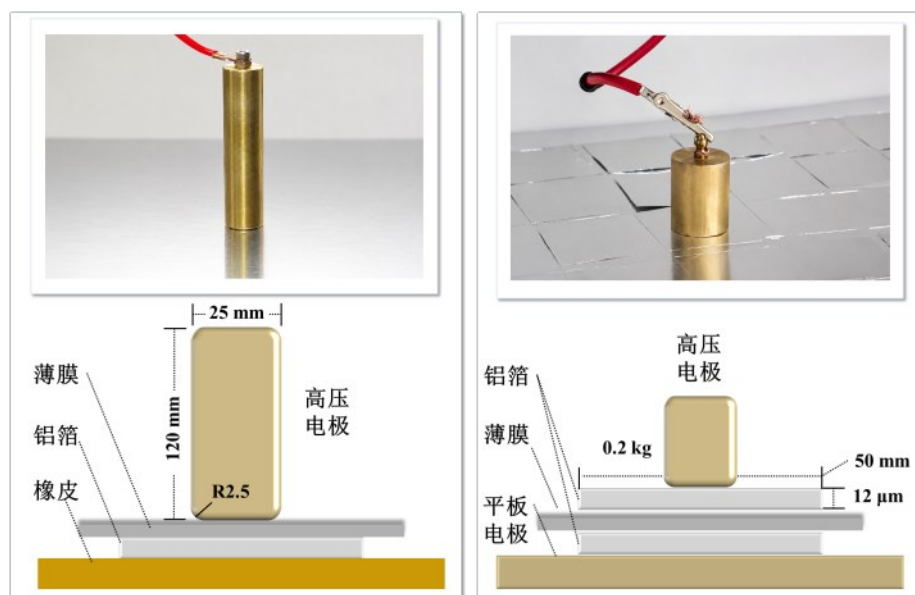


图 3 五十点电极方法、双铝箔平板电极方法装置实物及尺寸图

Fig. 3 Photograph and dimensional schematic of electrode configurations(fifty-point electrode method and double aluminum foil plate electrode method)

表 1 不同测试方法中电极参数

Tab. 1 Electrode parameters in different method

测试方法	上电极	下电极
金属球-柱电极方法	铜球电极:直径 20mm	铜柱电极:倒角半径 2.5mm、直径 25mm、长度 20mm
金属棒-棒电极方法	铜棒电极:倒角半径 1mm、直径 6mm、长度 40mm	铜棒电极:倒角半径 2mm、直径 6mm、长度 40mm
金属柱-板电极方法	铜柱电极:倒角半径 2.5mm、直径 25mm、长度 20mm;	铜板电极:倒角半径 2.5mm、直径 75mm、厚度 5mm
五十点电极方法	铜柱电极:倒角半径为 2.5mm、直径 25mm、高度 120mm	低压电极为一张退火铝箔,铝箔下方铺了一张厚约 3mm 的橡皮
双铝箔平板电极方法	铝箔电极:尺寸为 5cm×5cm,厚度为 12 μm。在铝箔上放置一个带圆边的高压电极,由黄铜制成,重量为 0.2kg	低压电极为一张退火铝箔,铝箔下放置一平板电极

从特征击穿场强 $E_{b63.2\%}$ 来看,不同测试方法所得结果存在明显差异。金属球-柱电极方法的 $E_{b63.2\%}$ 最高,为 823.08 V/μm;其次为金属棒-棒电极方法和金属柱-板电极方法,分别为 738.49 V/μm 和 701.28 V/μm;五十点电极方法所得结果最符合实际情况,为 625.72 V/μm;双铝箔平板电极方法最低,仅为 481.98 V/μm。

从 Weibull 形状参数来看,五十点电极方法的形状参数最高,达到 11.30,明显高于双铝箔平板电极方法的 3.89、金属球-柱电极方法的 3.16、金属棒-棒电极方法的 2.59 和金属柱-板电极方法的 2.17。形状参数越大,表明击穿数据分布越集中、离散性越小。因此,五十点电极方法测试结果稳定性最好,更能反映薄膜击穿性能的统计一致性。

3.2 不同数据处理方法所得的击穿场强对比

在标准中,通常使用中位数或算术平均值对结果进行处理。本文采用不同数据处理方法,分别计算了不同方法下击穿的中值 E_{b-med} 、平均值 E_{b-avg} 以及 Weibull 分布所得特征击穿场强 $E_{b63.2\%}$

同时,定义了击穿场强的分散性指标,用于表示测试数据的标准差与平均值的比值,如公式(3)所示。

$$RSD = \frac{S}{\bar{x}} = \frac{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 / (n - 1)}}{\bar{x}} \quad (3)$$

式中, RSD 为分散性, S 为样本标准差, x 代表每个测试数据, n 为测试数据的总数。

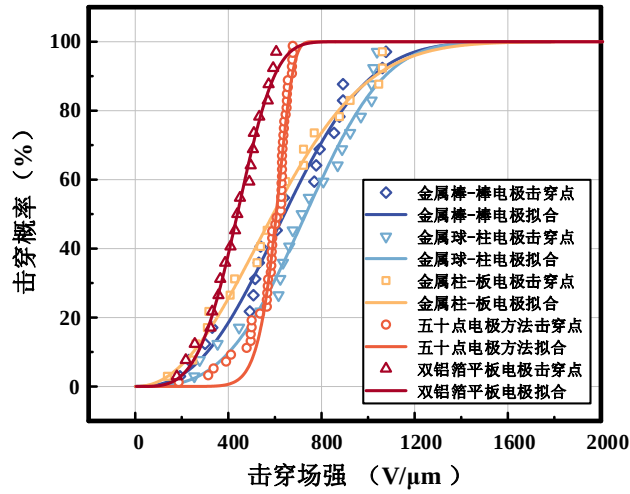


图 4 不同方法击穿场强的累积分布函数

Fig. 4 Cumulative distribution functions of breakdown strength obtained by different test methods

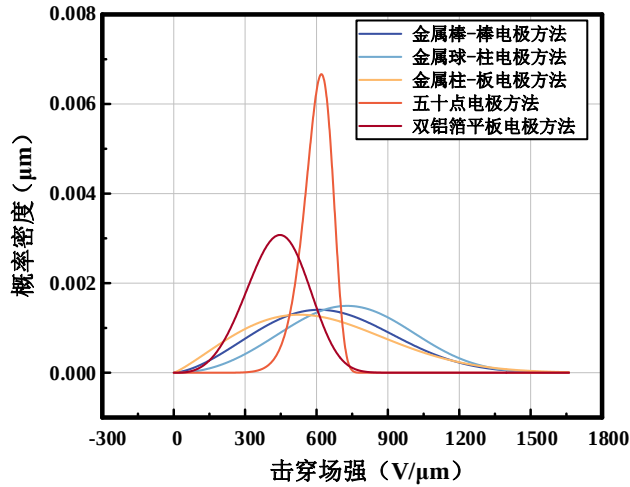


图 5 不同方法击穿场强的概率密度函数

Fig. 5 Probability density functions of breakdown strength obtained by different test methods

表 2 汇总了上述 5 种方法得到击穿场强测试结果,包括 E_{b-avg} 、 E_{b-med} 、 $E_{b63.2\%}$ 以及分散性与形状参数 β 。

4.3 讨论

比较不同方法的所得击穿场强,发现存在可达数百 $V/\mu m$ 的明显差异,表明电容器用双向拉伸聚丙烯薄

表 2 不同测试方法下击穿场强测试结果

Tab. 2 Breakdown strength results obtained by different test methods

测试方法	Weibull 特征击穿 场强 $E_{b63.2\%}/(V/\mu m)$	Weibull 形状参数 β	平均击穿场强 $E_{b-avg}/(V/\mu m)$	中值击穿场强 $E_{b-med}/(V/\mu m)$	分散性(%)
金属球-柱电极方法	823.08	3.16	718.68	715.38	34.35
金属棒-棒电极方法	738.49	2.59	642.49	615.38	39.90
金属柱-板电极方法	701.28	2.17	610.15	615.38	45.79
五十点电极方法	625.72	11.30	597.88	625.96	8.35
双铝箔平板电极方法	481.98	3.89	429.40	438.46	28.52

膜的击穿场强测试结果不仅与材料本身的耐电性能有关,还受到有效测试面积以及接触状态等因素的影响。因此,若不区分测试方法,仅以单一数值评价薄膜耐电性能,容易造成对材料性能的错误估计。

本文的研究目的为建立适用于电容器用聚丙烯薄膜的击穿性能评价方法,而非预测实际卷绕电容器的耐压性能。薄膜经卷绕形成电容器后,其介质受电面积、层间压强和电极结构均与薄膜击穿试验存在明显差异,并受到卷绕张力、边缘电场和层间微间隙等因素的共同影响。因此,薄膜击穿测试结果难以准确反映卷绕元件的实际绝缘状态,其测试结果应主要用于评价薄膜在规定条件下的统计耐电性能,而不宜直接用于推断电容器元件的耐压水平。

有效测试面积和电极-薄膜接触状态是造成不同测试方法结果差异的两个重要因素。薄膜击穿通常由受电区域内耐电性能最弱的局部缺陷所控制;随着有效测试面积增大或空间取样范围扩大,测试区域包含随机弱点的概率随之提高,测得的击穿场强通常呈下降趋势。电极与薄膜之间的局部气隙等因素又会引起局部电场集中,从而诱发由测试界面因素主导的提前击穿。因此,合理的薄膜性能评价方法应在弱点取样的统计代表性与电极接触状态的可控性之间取得平衡。

由表 2 可知:

(1)采用金属电极的测试方法所得 E_b 最高,特别是金属球-柱电极方法,相比五十点电极方法,其 $E_{b63.2\%}$ 、 E_{b-avg} 和 E_{b-med} 分别提高了 31.5%、20.2%、14.3%,这主要与其较小的有效测试面积和较稳定的电极接触状态有关。该方法中球形电极表面光滑棱角,局部电场畸变较小;同时,球形电极与薄膜的有效接触面积相对较小,覆盖到薄膜弱点的概率较低,因此更容易获得较高的击穿场强。然而,此类方法所得较高数值并不准确代表薄膜在实际的耐压水平,而更多反映了特定电极结构下的击穿结果。

(2)双铝箔平板电极方法所得击穿场强最低,相比五十点电极方法,其 $E_{b63.2\%}$ 、 E_{b-avg} 和 E_{b-med} 分别降低了 23.0%、28.2%、30.0%,这主要因为上下柔性电极的界面接触状态易产生空气隙。理论上,铝箔-铝箔电极接近平行板电极结构,其宏观电场分布应较为均匀;但试验用铝箔厚度较薄厚度仅为 12 μm ,柔性较强,且部分区域未压紧,容易受到操作过程中褶皱、脏污及贴合状态的影响,从而在铝箔与薄膜之间形成局部微气隙,从而诱发提前击穿,使测试结果明显偏低。该方法所得结果不仅包含薄膜自身弱点的影响,还不可避免的引入了操作过程误差。总体而言,该方法虽然对薄膜表面状态和局部缺陷较为敏感,但测试结果分散性较大,不利于形成稳定、可重复的工程评价结果。

(3)五十点电极方法与上述三种方法对比,可较好地兼顾弱点取样的统计代表性和电极接触状态的可控性。一方面,该方法具有合理的电极面积,降低了因测试区域过小而遗漏随机弱点的可能性;另一方面,其刚性柱形电极与柔性铝箔的配合能够保持相对稳定的界面接触状态,减少局部气隙对测试结果的干扰。该方法所得 $E_{b63.2\%}$ 、 E_{b-avg} 和 E_{b-med} 分别为 625.72 V/ μm 、597.88 V/ μm 和 625.96 V/ μm ,与电容器用聚丙烯薄膜工程评价中通常关注的 600 V/ μm 量级基本一致。因此,该方法在弱点空间取样与界面接触控制之间实现了较为合理的平衡。

五十点电极方法最低的数据分散性进一步证明了其作为薄膜评价方法的适用性。该方法的 Weibull 形状参数为 11.30,分散性指标为 8.35%,表明其击穿数据分布较为集中,受偶然性因素和异常低值的影响相对较小,测试重复性较好,有利于识别不同批次薄膜之间的性能差异。因此,在本文比较的五种方法和给定试验条件下,五十点电极法具有最好的数据稳定性和批次间性能评价能力。

薄膜击穿性能评价方法需兼顾局部弱点取样的空间代表性、电极界面接触的可控性以及测试结果的统计重复性。相比其他测试方法,五十点电极法兼具较好的统计代表性、较低的数据分散性与较强的工程可操作性,能满足电容器用聚丙烯薄膜材料击穿性能的评价的基本要求,适用于聚丙烯薄膜材料产品出厂检验、用户验收、批次稳定性评估以及国内外同类产品在同一试验条件下的对比测试。

4 结论

本文系统梳理了电容器用双向拉伸聚丙烯薄膜的国内外测试标准,比较了不同测试方法下薄膜击穿场强 E_b 测试结果的差异,并结合 Weibull 分布参数、测试平均值、中值及分散性指标,对各测试方法的适用性开

展评价,主要结论如下。

(1)不同测试方法下薄膜的击穿场强存在显著差异,电极结构所造成的薄膜与电极接触状态、接触面积等差异是影响测试结果的重要因素。其中,金属球-柱电极方法因接触面积小、表面光洁度高,局部电场畸变弱,所得 E_b 最高,其中 E_{b-avg} 超过 $700\text{ V}/\mu\text{m}$;而双铝箔平板电极方法易受铝箔褶皱、表面杂质及贴合状态等因素产生明显气隙,引发局部电场集中,造成薄膜击穿电场下降,击穿场强最低,所得 E_{b-avg} 低于 $500\text{ V}/\mu\text{m}$ 。

(2)综合击穿场强水平、数据分散性及工程实际应用,五十点电极方法更适用于电容器用双向拉伸聚丙烯薄膜的击穿性能评价。测试得到的 Weibull 形状参数为 11.30,分散性指标为 8.35%,表明测试数据集中性较高,重复性与稳定性好, $E_{b63.2\%}$ 、 E_{b-avg} 及 E_{b-med} 分别为 $625.72\text{ V}/\mu\text{m}$ 、 $597.88\text{ V}/\mu\text{m}$ 和 $625.96\text{ V}/\mu\text{m}$ 。

(3)开展国际产品进行对标分析时,不宜直接使用产品手册标注的击穿场强参数,需统一测试方法和测试条件后,通过实测数据完成对比分析,避免因测试体系不同所造成的材料性能评价偏差。

参考文献:

- [1] Sarjeant W. Capacitors[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1990, 25(5): 861-922.
- [2] 李化,李智威,黄想,等. 金属化膜电容器研究进展[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(2): 1-4+18.
- [3] S. J. Laihonon, U. Gafvert, T. Schutte, and et al. DC breakdown strength of polypropylene films: area dependence and statistical behavior[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(2): 275 - 286.
- [4] S. J. Laihonon, U. Gafvert, T. Schutte, and et al. Influence of electrode area on dielectric breakdown strength of thin poly(ethylene terephthalate) films [power capacitor applications][C]//2004 Annual Report conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 563-567.
- [5] M. Camalov, A. Orucov, A. Hashimov, and et al. Breakdown strength analysis of XLPE insulation types: A comparative study for multi-layer structure and voltage rise rate[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 223, 109703.
- [6] F. Akin and O. Arikan. Analysis of breakdown mechanism based on contact area and field enhancement factor of different electrode-material combinations[J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(9), 12674 - 12686.
- [7] D. Wetz, J. Mankowski, and M. Kristiansen. The Impact of Electrode Area and Surface Roughness on the Pulsed Breakdown Strength Water[C]// 2005 IEEE Pulsed Power Conference, Monterey, CA, USA: IEEE, 2005: 1163-1166.
- [8] 电气绝缘用薄膜 第2部分:试验方法:GB/T 13542.2-2021. [S]. 2021.
- [9] 绝缘材料电气强度试验方法 第1部分:工频下试验:GB/T 1408.1-2016. [S]. 2016.
- [10] 绝缘材料电气强度试验方法第2部分:对应用直流电压试验的附加要求:GB/T 1408.2-2016. [S]. 2016.
- [11] 电气绝缘用薄膜 第2部分:试验方法:GB/T 13542.2-2009. [S]. 2009.
- [12] Electric strength of insulating materials - Test methods - Part 1: Tests at power frequencies: IEC 60243-1: 2013. [S]. 2013.
- [13] Electric strength of insulating materials - Test methods - Part 2: Additional requirements for tests using direct voltage: IEC 60243-2: 2013. [S]. 2013.
- [14] Specification for plastic films for electrical purposes - Part 2: Methods of test: IEC 60674-2: 2016. [S]. 2016.
- [15] Testing methods of plastic films for electrical purposes: JIS C 2151:2019. [S]. 2019.
- [16] Specification for plastic films for electrical purposes - Part 2: Methods of test: DIN EN 60674-2:2020-02. [S]. 2020.
- [17] Tervakoski Films Group. Tervakoski - film - ECT - LOW [DB/OL]. 2024-06. <https://tervakoskifilm.com/wordpress/wp-content/uploads/2024/06/Tervakoski-film-ECT-LOW.pdf.pdf#1#1>.
- [18] Toray Industries, Inc. Electrical characteristics[EB/OL]. 2026-04-02. https://www.films.toray/en/knowledge/kno_002_4.html.