

纯国产粒料和复合粒料粗化膜在油浸式高压电容器中的应用性研究

雷乔舒, 严浩, 梁晓

(无锡赛晶电力电容器有限公司, 江苏 无锡 214177)

摘要: 针对油浸式高压电容器用聚丙烯粗化膜粒料依赖进口的问题,以两家厂商生产的纯进口粒料、复合粒料、纯国产粒料粗化膜为研究对象,系统开展材料理化性能、电气性能及成品电容器多维度对比试验。测试分析薄膜粗化度、结晶度、机械性能、热收缩率,并采用50点电极法、元件试验、模型电容器试验评价电气特性,同时对成品开展介质损耗、热稳定及加速老化试验。结果表明:纯国产粒料薄膜粗化沟槽更深,电气性能离散性大、击穿场强偏低,高温介质损耗不达标,加速老化寿命不足;复合粒料薄膜在微观形貌、理化特性、电气稳定性及耐老化性能上均与进口粒料薄膜接近,各项指标满足标准要求。研究证实复合粒料粗化膜可替代进口材料投入实际应用;纯国产粒料膜需优化原料与制膜工艺、降低设计场强以提升使用可靠性。研究成果可为国产聚丙烯粗化膜在高压电容器领域的推广应用提供参考。

关键词: 油浸式高压电容器;聚丙烯粗化膜;国产粒料;复合粒料;电气性能;加速老化

Study on the Application of Roughened Films From Pure Domestic Pellets and Composite Pellets in Oil-immersed High-voltage Capacitors

LEI Qiaoshu, YAN Hao, LIANG Xiao

(Wuxi Sunking Power Capacitor Co., Ltd., Jiangsu Wuxi 214177, China)

Abstract: In response to the dependence on imported polypropylene pellets for roughened films in oil-immersed high-voltage capacitors, in this study the roughened films derived from such three pellet categories as purely imported, composite, and purely domestic from two manufacturers are taken as the study object. A comprehensive array of comparative tests, covering physicochemical properties, electrical behavior, and multi-dimensional characteristics of the finished capacitors, is performed. The roughness, crystallinity, mechanical properties and thermal shrinkage of the films are tested and analyzed. The 50-point electrode method, component tests and model capacitor tests are adopted to assess the electrical characteristics and, at the same time, tests including dielectric loss, thermal stability and accelerated aging are performed on finished products. The results show that the pure domestic pellets have deeper roughened grooves, larger dispersion of electrical properties, lower breakdown field strength, non-compliance of dielectric loss at high temperature and insufficient service life under accelerated aging. In contrast, the films made of composite pellets are close to those made of imported pellets in terms of microscopic morphology, physical and chemical properties, electrical stability and aging resistance, with all indicators meeting relevant standards. It is verified by the study that the composite pellet roughened films can replace imported materials for practical application. For pure domestic pellet films, it is necessary to optimize raw materials and film-making processes as well as reduce the design field strength to improve operational reliability. The study results can provide a reference for the popularization and application of

收稿日期:2026-06-23; 修回日期:2026-08-03

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2401504)。

Project Supported by the National Key R & D Program of China(2021YFB2401504)。

domestic polypropylene roughened films in high-voltage capacitors.

Keywords: oil-immersed high-voltage capacitor; polypropylene roughened film; domestic pellet; composite pellet; electrical property; accelerated aging

0 引言

我国油浸式高压电容器在 20 世纪 90 年代得到迅猛发展,从膜纸复合电容器到全膜电容器,技术和产品性能得到不断突破。如今过去 30 年,高压电容器的产品技术成熟、性能优异、故障率低、寿命长,一方面源于相关规范中通常会提出设计场强限制要求,即全膜电容器的设计场强(压紧系数 $k=1$ 时)不超过 57 kV/mm,生产企业对全膜电容器的设计和工艺生产不断改进完善,产品质量得到了大幅度的提高^[1]。另一方面,也源于高压电容器所用的 3 大主要原材料—铝箔、绝缘油、聚丙烯粗化膜性能指标的稳定,电容器基本都能通过 GB/T 11024^[2-3]和 IEC 60871^[4-5]相关标准要求的所有试验项目。但遗憾的是,3 大主材中最重要的聚丙烯粗化膜粒料高度依赖进口,依然是卡脖子问题。近几年,国家的科技项目,致力于解决粗化膜粒料的卡脖子问题,也取得一定的进展。但如何使国产粒料膜在性能上保持使用的稳定和质量,并在市场上全面推广应用,仍然有一段路要走。

王柯等人针对国产料粗化膜的研制进展进行探讨,并与进口料做了对比^[6];段光伟等人对电容器膜用聚丙烯的现状和发展进行了论述^[7],但未有相关文献针对粗化膜用纯国产粒料、复合粒料与进口粒料进行性能验证对比,讨论其在产品中应用的可行性。本文针对纯国产粒料粗化膜、国产粒料和进口粒料按一定比例调制的复合粒料粗化膜进行验证分析,提出相关应用的可行性建议,希望能促进纯国产粒料和复合粒料这两种材料在油浸式高压电容器上的应用和发展。薄膜样品来源于国内拉

膜厂家 A 和 B,其中 A 厂的样品包括进口粒料粗化膜(A-样品 1)、纯国产粒料粗化膜(A-样品 2)、复合粒料粗化膜(A-样品 3);B 厂的样品中包含进口粒料粗化膜(B-样品 1)、纯国产粒料粗化膜(B-样品 2),薄膜样品规格厚度基本一致。

1 不同粒料粗化膜材料性能对比

高压油浸式电容器所用粗化膜与干式金属化膜电容器所用基膜的粒料还是有差异的,两种膜所用树脂并不完全相同,粗化膜中的树脂里抗氧化剂比普通的电晕膜树脂含量少,且添加了有利于粗化的添加剂^[8],粗化膜表面粗化是在薄膜加工过程中通过温度和外力改变内部的晶型结构来实现^[9-15],高压油浸式电容器所用的粗化膜为双面粗化,通常分为主粗化面和次粗化面,两面的粗化度不一样。表征薄膜粗糙度通常有 3 个参数^[6,9-10]:平均粗糙度 R_a 、不平度均值 R_m 、微观不平度 R_z 。 R_a 越大,意味着薄膜凹凸表面数量越多或者凹坑深度越深,薄膜表面的均匀度越差;而 R_z 是峰顶至谷底高度的最大值, R_z 值越大,薄膜介电强度最低值越小,因此,粗化度对薄膜的电气性能有较大影响。另外,薄膜晶相结构对电气耐受性能也有很大影响,结晶度越高,晶区越完善,分子链排列有序致密,越有利于提高击穿场强^[9]。

1.1 粗化度

薄膜的粗化程度可通过空隙率性能指标的检测获得,更直观的表象指标也可采用激光扫描显微镜(laser scanning microscope, LSM)进行高精度三维形貌测量获得,放大倍数为 100 倍,观察面积约为 256 $\mu\text{m} \times 256 \mu\text{m}$ 。表 1 为样品空隙率和结晶环沟槽测试结果。

表 1 不同粒料膜空隙率及结晶环沟槽深度测量对比
Table 1 Comparison of porosity and groove depth of crystalline rings for films made from different pellets

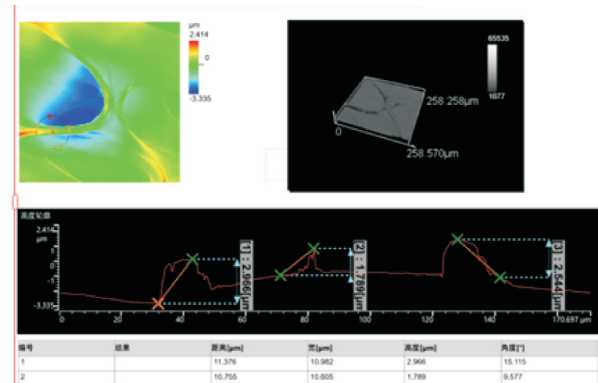
样品编号	空隙率/%			主粗化面结晶环		次粗化面结晶环	
	最大值	最小值	平均值	沟槽深度最大尺寸/ μm		沟槽深度最大尺寸/ μm	
				第 1 测试位置	第 2 测试位置	第 1 测试位置	第 2 测试位置
A-样品 1	9.7	7.4	8.6	2.966	1.789	1.088	0.638
A-样品 2	9.3	7.8	8.6	5.070	—	1.646	1.410
A-样品 3	10.3	8.8	9.4	3.004	2.137	0.924	1.366
B-样品 1	8.9	7.0	8.1	1.682	1.772	1.416	1.573
B-样品 2	8.1	6.9	7.3	2.864	1.831	2.951	2.274

按照标准 GB/T13542.3—2006^[14],质量密度法标称厚度 $\leq 12 \mu\text{m}$ 的粗化膜,空隙率平均值要求

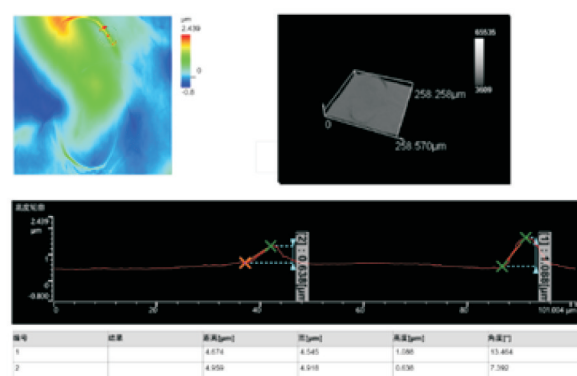
9.0% $\pm$ 3%,最大值 $\leq$ 15.0%,最小值 $\geq$ 5.0%,从表 1 看,几种样品空隙率均在要求范围内,但 A 厂的空隙率

较B厂的大,同厂家不同粒料的空隙率并没有明显差异。结合结晶环沟槽深度测量对比情况看,主粗化面结晶环沟槽深度都比次粗化面沟槽深度大,国产粒料不管是A还是B,主粗化面和次粗化面结晶环沟槽深度都最深;A的复合粒料膜沟槽深度与进

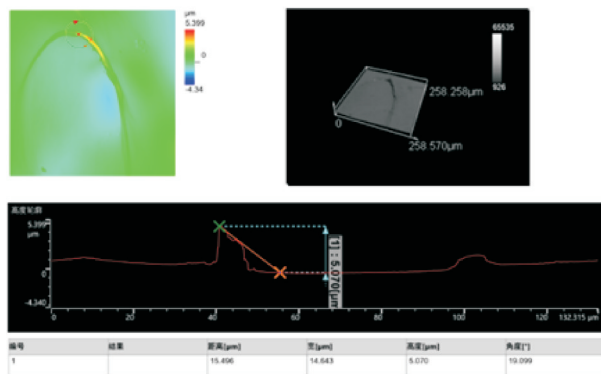
口粒料膜较接近。B样品主粗化面沟槽深度较A的小,这与空隙率检测结果一致,主粗化膜结晶沟槽深度是影响空隙率的主要因素,也是影响电气性能一致性的主要因素。样品表面结晶沟槽如图1所示。



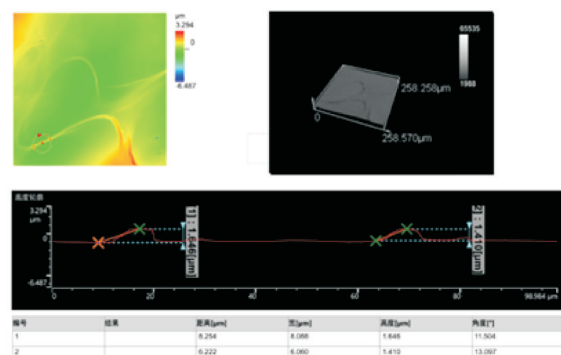
(a) A-样品1-主粗化面结晶沟槽



(b) A-样品1-次粗化面结晶沟槽



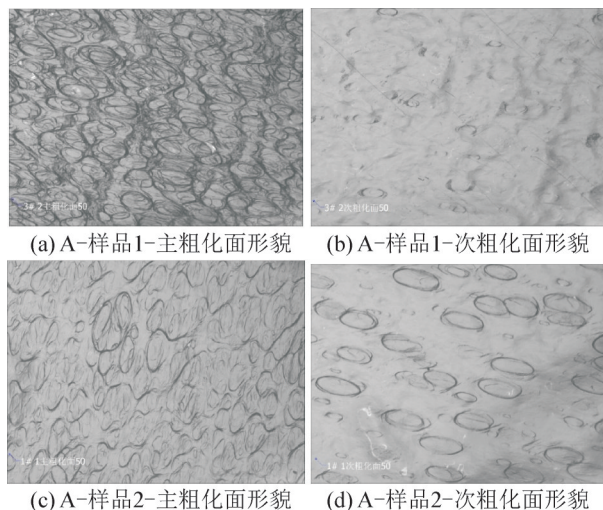
(c) A-样品2-主粗化面结晶沟槽



(d) A-样品2-次粗化面结晶沟槽

图1 样品表面结晶沟槽
Fig. 1 Crystalline grooves on sample surfaces

借助透反射金相显微镜,在50倍物镜下对样品粗化表面微观形貌开展进一步的观察,结果如图2所示。



(a) A-样品1-主粗化面形貌 (b) A-样品1-次粗化面形貌
(c) A-样品2-主粗化面形貌 (d) A-样品2-次粗化面形貌

图2 样品表面形貌
Fig. 2 Surface morphology of samples

从形貌对比情况看,A-样品1主粗化相比样品2要致密,次粗化膜整体比较平整光滑,粗化膜在纵拉时利用温度控制将 β 晶型转化成 α 晶型,但 β 晶型的密度大于 α 晶型,在表面形成一定的沟槽结构形成粗化。等规度高不利于薄膜粗糙表面的形成,因为等规度高分子构型稳定,不利于 β 晶型向 α 晶型转换,部分 β 晶型不发生晶态转变,薄膜表面就比较光滑^[9],类似于A-样品1的次粗化形貌特征。

1.2 结晶度

结晶度与粒料的等规度、薄膜在拉伸过程成型的 β 晶和 α 晶直接相关,粒料等规度越高,结晶度越高,但过高的结晶度同时会带来薄膜韧性、断裂伸长率降低等影响^[8-9,16-17]。目前结晶度的测试主要采用两种方法:DSC(differential scanning calorimetry)热分析法和广角X射线衍射(wide-angle X-ray diffraction, WAXD)法,分别使用了进口设备的差示扫描量热仪

(DSC)和X射线多晶衍射仪(XRD),DSC通过 α 晶熔融焓为标准值核算整体的结晶度,X射线衍射WAXD法则通过图谱分峰拟合的方式,统计 α 晶衍射峰总面积。

测试结果见表2。从测试结果看,除A-样品2的X衍射法结晶度未达到50%,其余测试结果均在50%以上,A-样品3的X射线衍射法结晶度测试结果较大。X衍射法和DSC热分析法由于测试方法及采用的测试设备不同,同样的样品在测试结果上存在一定的差异,DSC热分析法相对直观且厂家具备相应的测试条件,通常薄膜厂家会以DSC热分析测试结果为准。

表2 结晶度测试数据
Table 2 Crystallinity test data

样品编号	结晶度测试	
	X衍射法/%	DSC热分析/%
A-样品1	53.31	51.80
A-样品2	49.76	54.65
A-样品3	59.00	53.85
B-样品1	52.48	55.30
B-样品2	51.24	57.20

1.3 理化特性

1.3.1 机械性能

对薄膜的常规机械性能进行测试,对比不同粒料制备薄膜的差异。薄膜常规机械性能试验结果见表3。

表3 薄膜常规机械性能试验结果
Table 3 Conventional mechanical properties test results of films

项目	方向	A-样品1	A-样品2	A-样品3	B-样品1	B-样品2	标准要求值
拉伸强度/Mpa	纵向	136	130	129	154	173	≥ 120 MPa
	横向	280	277	276	251	287	
断裂伸长率/%	纵向	165	158	155	130	115	$\geq 30\%$
	横向	45	41	53	60	50	

由表可见,所有样品拉伸强度和断裂伸长率都满足标准要求,A厂的3种样品拉伸强度和断裂伸长率差异并不大,但B厂的样品2的断裂伸长率值相对较低,这和材料分子链排列规整程度有一定的关系。

1.3.2 热收缩率

热收缩率反映薄膜在温度载荷下的尺寸稳定性,是评价绝缘薄膜热适配性的关键指标,不同粒料薄膜的横向、纵向热收缩率分别绘制成热收缩率曲线,如图3-4所示。

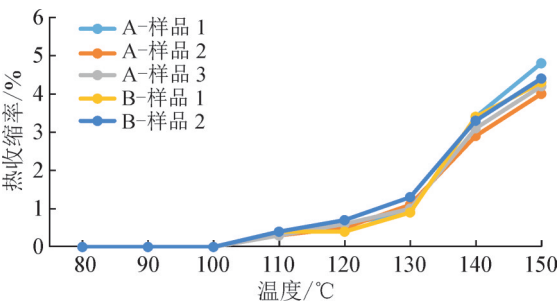


图3 薄膜横向热收缩率曲线
Fig. 3 Transverse thermal shrinkage curve of film

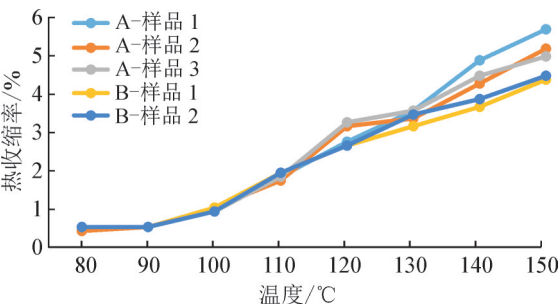


图4 薄膜纵向热收缩率曲线
Fig. 4 Longitudinal thermal shrinkage curve of film

从曲线变化趋势可以看出,国产粒料与进口粒料薄膜的热收缩行为基本一致,随温度升高收缩率呈上升趋势,高温区间热收缩率均有显著增大。等规度是影响薄膜耐高温收缩性能的关键指标之一,本次试验所用国产粗化膜粒料与进口粒料等规度均为99.2%,二者等规度水平一致。聚丙烯原料等规度是决定薄膜热收缩率与耐高温尺寸稳定性的核心分子结构参数,二者呈显著负相关规律:等规度越高,薄膜高温热收缩率越低、耐高温性能越优异。等规度更高时,聚丙烯分子链立构排列更规整,结晶能力更强;聚丙烯分子带有甲基大取代基,会以螺旋构象沿平行中心轴紧密堆砌形成稳定晶相,晶区内分子链构象固定,分子紧密聚集可大幅提升分子间作用力,受热条件下分子链相对滑移受到显著约束,从而抑制高温热收缩变形^[9]。在此前提下国产粒料和复合粒料薄膜在热收缩特性上基本一致,证明在同等等规度条件下,国产粗化膜粒料的热收缩性能可达到进口粒料同等水平。

1.4 电气性能对比

对于高压绝缘薄膜而言,介电强度性能是决定其应用可靠性与使用寿命的核心指标,也是国产粒料与进口粒料差异最显著的环节。虽然国产粒料制备的薄膜常规理化性能接近进口水平,但前期试验发现其电气性能存在明显离散性,低值数据占比偏高,安全裕度不足,需通过专项试验进一步验证。为量化分析电气性能的离散特征,本文采用耐

压测试仪,按50点电极法(DC)对薄膜分别在常温与高温条件下开展测试。

薄膜50点电极法击穿场强单值图如图5所示。A厂和B厂国产粒料不管是在常温还是高温下,击穿场强离散性均比较大,为进一步研究各个样品的一致性,采用威布尔曲线概率图进行表征分析,见图6。

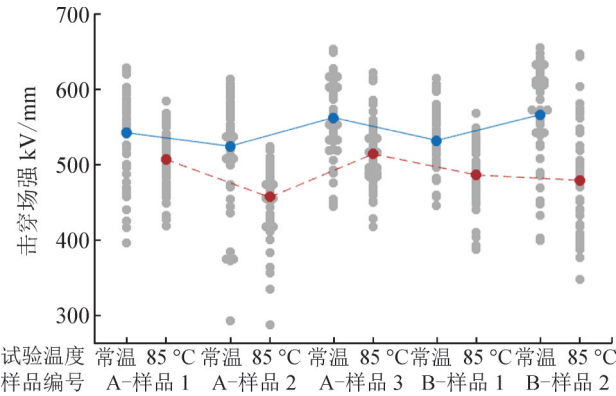


图5 薄膜50点电极法击穿场强单值图
Fig. 5 Single-value plot of breakdown strength of the film measured by 50-point electrode method

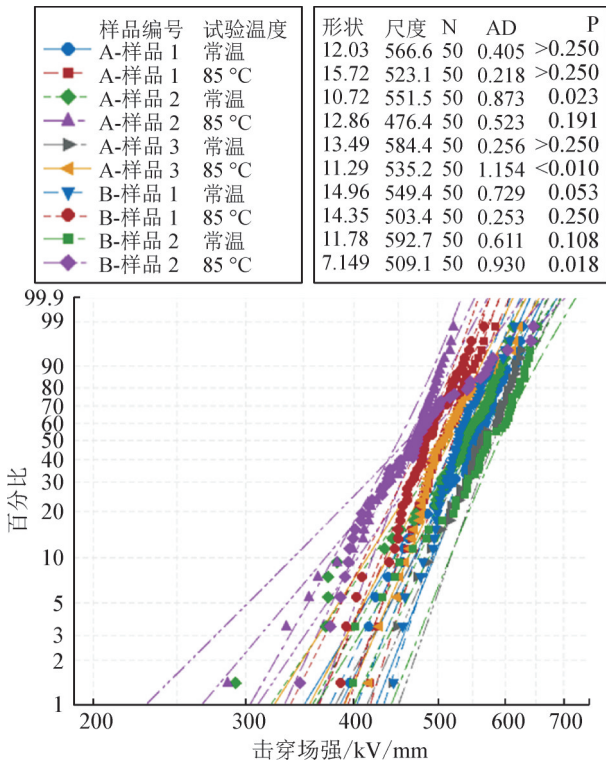


图6 薄膜50点电极法击穿场强威布尔概率图
Fig. 6 Weibull probability plot of breakdown strength of the film measured by 50-point electrode method

从威布尔概率图分布情况看,进口粒料和复合粒料薄膜数据点分布集中,线性相关性好,离散程

度低;而国产粒料薄膜数据分布较宽,曲线斜率更小,低值拖尾现象明显。威布尔形状参数直接反映数据离散性,B样品-2薄膜85℃下的形状参数显著偏小仅7.1,国产粒料薄膜样品较弱离群点数均显著偏多,表征其电气性能稳定性较差。

2 元件电气性能测试对比

2.1 元件法电气性能测试

根据标准 GB/T 13542.2—2021^[18],薄膜材料的电气强度的直流试验可采用模型电容器元件进行,采用铝箔突出型结构,单层被试薄膜,本文所制备的元件采用正常生产制造的卷绕机和卷绕参数,元件凸箔无折边,有效极板长度9m,每种样品规格制备16片元件。将元件两边的凸箔电极分别接到击穿试验仪器的高压电极和接地电极,施加直流电压,升压速度200V/s,记录击穿电压值,换算成击穿场强后的单值图如图7所示。

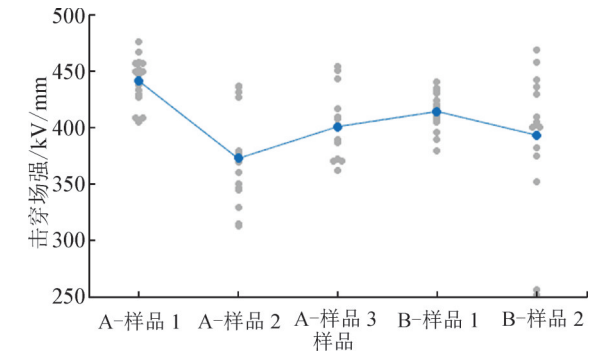


图7 薄膜元件法击穿场强单值图
Fig. 7 Single-value plot of breakdown strength by film element method

从元件法测试结果看,纯国产粒料的A-样品2和B-样品2的击穿电压离散性存在较大问题,复合粒料的A-样品3与进口粒料A-样品1和B-样品1一致性相对较好,均值也较接近进口粒料的结果。元件法击穿电压测试由于会比单层薄膜50点电极法多一层空气的介质,击穿场强较单层薄膜值要小。

2.2 模型电容器试品元件测试

将样品薄膜材料制备成1:1比例的模型电容器试品,进行材料的元件性能对比。元件的参数与BAM11/ $\sqrt{3}$ -334-1W产品元件参数完全一致,生产过程与产品的生产工艺完全一致,元件生产完成后在芑基甲苯的绝缘油中进行元件耐压试验,每种规格元件试品各10片分别进行交流 and 直流的击穿电压测试,测试结果如图8所示。

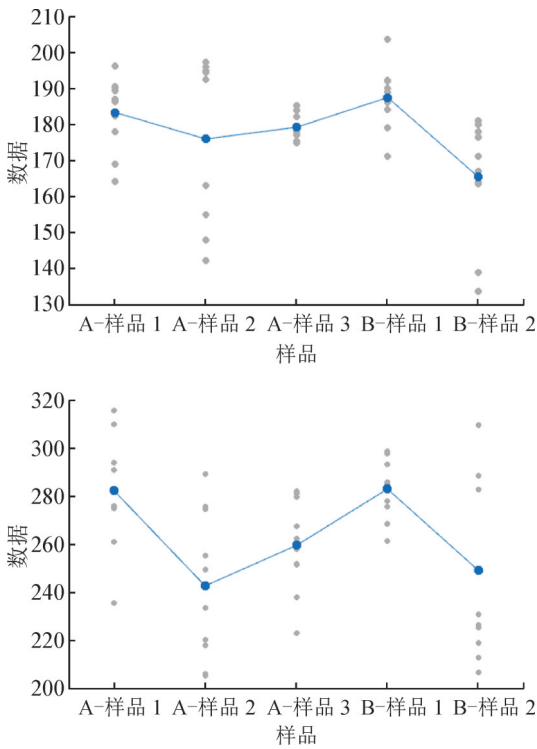


图8 产品元件交直流击穿场强单值图
Fig. 8 Single-value plot of AC/DC breakdown field strength of the capacitor element

元件在油中进行交直流击穿电压,可以看作是油和聚丙烯薄膜串联复合介质结构,本文在压紧系数相同的情况下,交流根据文献^[19],全膜电容器的介质结构中聚丙烯薄膜的直交比在 1.5~1.7 倍,绝缘

油的直交比是聚丙烯薄膜的 1/10 左右,对样品的平均直流击穿场强和平均交流击穿场强进行比较,进口粒料的 A-样品 1 和 B-样品 1 直交比分别为 1.54 和 1.51,复合粒料的 A-样品 3 直交比在 1.45,纯国产粒料的 A-样品 2 和 B-样品 2 直交比分别为 1.38 和 1.51,将进口粒料的 A-样品 1 和 B-样品 1 交直流击穿场强均视为 1,则其他样品与进口粒料均值比值如表 4 所示。

从表 4 可以看出,复合粒料 A-样品 3 的击穿场强均值与进口粒料 A-样品 1 较为接近,A-样品 2 的直流击穿场强均值比 A 的进口粒料值低。国产粒料 B-样品 2 交直流击穿场强均值都比进口粒料 B-样品 1 低。根据电工原理^[20],复合介质结构的交流电压按电容反比例分配,在膜上作用的交流电压计算公式为

$$U_{am} = \frac{C_y}{C_y + C_m} U_a = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_m d_y}{\epsilon_y d_m}} U_a \quad (1)$$

式中: U_a 为施加在元件上的交流电压; U_{am} 为施加在聚丙烯薄膜上的交流电压; $C_y = \epsilon_0 \epsilon_y S/d_y$ 和 $C_m = \epsilon_0 \epsilon_m S/d_m$ 分别是绝缘油和聚丙烯薄膜的等效电容; d_y 和 d_m 分别是绝缘油和聚丙烯薄膜的等效厚度; ϵ_y 和 ϵ_m 分别是绝缘油和聚丙烯薄膜的相对介电常数。

表4 以进口粒料样品为基准的交直流击穿场强比值
Table 4 AC/DC breakdown field strength ratios with imported pellet samples as reference

击穿场强均值	A-样品 1	A-样品 2	A-样品 3	B-样品 1	B-样品 2
交流击穿场强均值	1	0.96	0.98	1	0.88
直流击穿场强均值	1	0.86	0.92	1	0.88

在直流电压下,电导电流连续, $\gamma_m E_m = \gamma_y E_y$,电压按介质的等效并联电阻正比例分配,在膜上作用的直流电压计算公式为

$$U_{dm} = \frac{R_m}{R_y + R_m} U_d = \frac{U_d}{1 + \frac{\gamma_m d_y}{\gamma_y d_m}} \quad (2)$$

式中: U_d 为施加在油膜复合介质结构上的直流电压; R_y 和 R_m 分别是绝缘油和聚丙烯薄膜的并联等效电阻; γ_y 和 γ_m 分别是绝缘油和聚丙烯薄膜的体积电导率,其余同上。

由于所有薄膜规格的样品制备在一个模型电容器中, d_y 和 d_m 、 ϵ_y 、 R_y 可视为相同,可认为影响到 U_{dm} 最终值的决定性因素为聚丙烯薄膜的相对介电常数 ϵ_m 以及体积电导率 γ_m ,导致不同规

格材料在交流和直流电压下击穿场强造成较大差异。

3 产品电和热的性能测试对比

对规格材料制备成产品进行电和热的性能测试,规格型号 BAM11/ $\sqrt{3}$ -334-1W,本次制备的产品,结构设计、制造工艺及其他材料均相同,仅在薄膜材料上的差异。通过产品损耗和温度的曲线测量、热稳定试验、加速老化试验,评估不同材料耐受电和热的能力。

3.1 产品损耗和温度的曲线测量

测量损耗角正切 $\tan \delta$ 可检查产品的介质材料质量、处理工艺是否满足要求。根据标准 GB/T 840—2016^[21],在 20℃~80℃ 内测量 5 个点,测量值在规定要求范围内,且各点的值相差不大于±30%,

80℃时测量值应小于20℃时的测量值。产品分别在-40℃、-20℃、0℃、20℃、35℃、50℃、65℃、80℃的温度下进行电容和损耗测量,曲线如图9所示。

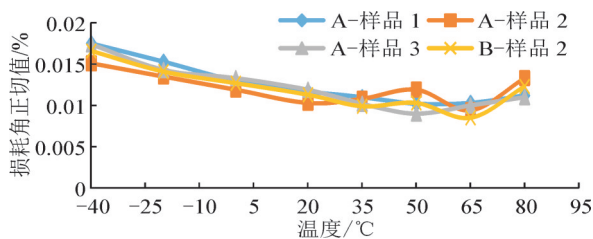


图9 不同粒料膜产品损耗角正切值与温度的关系曲线
Fig. 9 Relationship curves between dissipation factor and temperature for films from different pellets

从曲线的趋势看,4种规格材料在20℃~80℃内均符合各点值相差不大于±30%的要求,纯国产粒料的A-样品2、B-样品2不满足80℃时测量值应小于20℃的要求,进口粒料A-样品1和复合粒料A-样品3的曲线趋势相对比较一致,且符合相关标准要求。另外,进口粒料和复合粒料均在50℃~60℃之间呈现较低损耗,国产粒料产品在50℃时呈现向上波动,在65℃呈现低值。考虑制备的产品介质损耗存在的差异性,导致产品损耗曲线的差异。

3.2 热稳定试验

对制备的产品按GB/T11024.1^[2]进行热稳定试验,试验环境温度55℃,施加电压为 $1.2U_n$ (7.62 kV),产品立放。试验结果表明4种规格材料产品均能通过热稳定试验,箱壳大面从下往上的最热点温度复合粒料较进口粒料温升高0.7 K,国产粒料较进口粒料高2 K,热稳定试验均能通过,表明复合粒料和国产粒料材料在短时耐热性能和电性能上基本和进口粒料无明显差异。

3.3 加速老化试验

高压电容器的运行过程中,就是介质在电和热的作用下不断发生电老化、热老化和电化学老化,使产品各项性能逐渐变差,最终产品寿命终止。根据文献^[22-23],加速老化试验条件可依据估算电容器寿命的经验公式和标准GB/T11024.2^[3]中对高压并联电容器的老化试验进行等效计算获得。

电容器的寿命与运行电压的关系式为

$$\frac{L}{L_0} = \left(\frac{U}{U_0} \right)^n \quad (3)$$

式中: U 、 U_0 代表不同的运行电压; L 和 L_0 分别代表运行电压为 U 时电容器的寿命和运行电压为 U_0 时电容器的寿命。

按照标准GB/T11024.2,老化试验可以按照以

下两种方式进行:

- 1) 试验电压为 $1.25U_n$,持续时间是3 000 h;
- 2) 试验电压为 $1.4U_n$,持续时间是1 000 h。

根据式(3),可以计算得到寿命指数 n 为9.69。

由此可计算加速老化试验如施加 $1.8U_n$ 的试验电压,对应的试验时间约为88 h。

产品的寿命是电和热联合作用的结果,加速老化试验需针对不同电压倍率下结合对应的温度要求^[22-23],标准GB/T 11024.2中对老化试验过程的温度应至少等于下列两温度中的较高者:1)60℃;2)24 h平均最高温度加上生产单元在热稳定结束时测得的电介质温升。

结合样品热稳定试验的心子温度,本次加速老化试验环境温度按45℃,样品介质温度高于标准中对于介质温度的两个要求,试验时长90 h,保留了一定的安全裕度。试验结果为进口粒料A-样品1和复合粒料A-样品3通过加速老化试验,纯国产粒料的A-样品2在85.2 h时击穿,纯国产粒料的B-样品2在68 h时击穿,不同材料性能在加速老化试验条件下结果有明显差异。

4 结语

4.1 结论

本文针对纯进口粒料薄膜、进口粒料和国产粒料的复合粒料薄膜、纯国产粒料薄膜的材料性能对比、元件击穿电压对比,以及制备成产品进行损耗、热稳定、加速老化试验验证对比,探讨国产粒料和复合粒料粗化膜应用的可行性。

1)通过薄膜材料粗化度对比,同拉膜厂家的不同粒料薄膜空隙率检测结果并没有明显差异;结合薄膜结晶环沟槽深度测量对比,国产粒料主粗化面和次粗化面结晶环沟槽深度均比进口粒料膜深,复合粒料膜结晶环沟槽深度与进口粒料膜接近。从薄膜表面形貌对比情况看,A厂进口粒料主粗化相比国产粒料膜表面结晶较致密,次粗化膜整体较平整光滑。结合结晶环沟槽深度会直接影响到薄膜电气性能的一致性。采用X射线衍射法和DSC热分析分别进行结晶度测试,结晶度基本都在50%以上。

2)进行薄膜材料的理化特性对比,样品材料通过拉伸强度和断裂伸长率的机械性能测试,A厂3种不同粒料薄膜机械性能无明显差异,B厂国产粒料样品膜断裂伸长率相对较低,材料分子链排列规整程度有一定的关系。在热收缩特性上,3种材

料热收缩特性上基本一致,说明国产粒料粗化膜在粒料等规度的性能上与进口粒料无明显差异。

3)对薄膜材料进行50点法击穿场强对比,通过威布尔概率图进行分析,进口粒料和复合粒料薄膜数据点分布集中,线性相关性好,离散程度低;国产粒料薄膜数据分布较宽,曲线斜率更小,低值拖尾现象明显。表征国产粒料薄电气性能稳定性较差。

4)制备成元件进行击穿电压测试。元件法电气性能测试结果表征国产粒料膜击穿电压离散性存在较大问题。模型电容器试品元件进行了交流和直流的击穿电压测试,复合粒料膜元件击穿场强均值与进口粒料较为接近,同厂家国产粒料膜元件交直流击穿场强均值都比进口粒料低。进行不同击穿电压比值分析,薄膜材料的相对介电常数 ϵ_m 、体积电阻率 γ_m 是造成交流和直流击穿电压差异的主要因素。

5)制备的产品进行电和热性能测试,从产品损耗和温度曲线看,国产粒料膜产品在80℃高温下的损耗值不满足相关标准要求,且在50℃时呈现向上波动情况;热稳定试验不同粒料膜产品均能通过;从加速老化试验结果表明纯国产粒料膜使用寿命达不到进口粒料膜相应的时长要求,但复合粒料膜能满足运行使用寿命要求。

4.2 建议

1)建议从源头进一步优化纯国产粒料的工艺以及拉膜工艺技术,减小薄膜粗化时结晶环沟槽深度,提高膜表面结晶致密性,提升膜材料电气性能的一性。

2)复合粒料膜与纯进口粒料膜性能接近,且产品能通过加速老化试验,满足运行使用寿命要求,建议进一步推广生产和使用。

3)纯国产粒料膜如要进一步推广使用,可考虑通过增加设计裕度、降低场强的方式,满足使用条件要求,通过粒料和薄膜在批量生产和应用中积累经验,优化改进粒料和拉膜工艺,满足高压电容器产品的相应性能要求,最终达到进口粒料膜的使用水平。

参考文献

- [1] 倪学锋,贾华,赵倩.我国高压电容器几个关键问题的研究[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(4):86-90.
NI Xuefeng, JIA Hua, ZHAO Qian. Research on several key issues of high-voltage capacitors in China[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(4): 86-90.
- [2] 标称电压1 000 V以上交流电力系统用并联电容器第1

部分:总则:GB/T 11024.1—2019[S]. 2019.

Shunt capacitors for a. c. power systems having a rated voltage above 1 000 V—Part 1: General: GB/T 11024.1—2019[S]. 2019.

- [3] 标称电压1 000 V以上交流电力系统用并联电容器第2部分:老化试验:GB/T 11024.2—2019[S]. 2019.
Shunt capacitors for a. c. power systems having a rated voltage above 1 000 V—Part 2: Ageing testing: GB/T 11024.2—2019[S]. 2019.
- [4] Shunt capacitors for a. c. power systems having a rated voltage above 1 000 V—Part 1: General: IEC 60871-1: 2014 [S]. 2014.
- [5] Shunt capacitors for a. c. power systems having a rated voltage above 1 000 V—Part 2: Endurance testing: IEC TS 60871-2: 2014+AMD1: 2022[S]. 2022.
- [6] 王柯,刘刚,孟森,等.国产料聚丙烯电容膜的研发进展[J].高电压技术,2025,51(5):2234-2245.
WANG Ke, LIU Gang, MENG Sen, et al. Research and development progress of domestic polypropylene capacitor film[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2234-2245.
- [7] 段光伟.浅析电容器膜用聚丙烯的现状与发展[J].当代化工研究,2020,(14):8-10.
DUAN Guangwei. Present situation and development of polypropylene for capacitor film[J]. Modern Chemical Research, 2020, (14): 8-10.
- [8] 刘强,邢照亮,周昌浩,等.电容器用BOPP薄膜及其专用树脂研究进展[J].绝缘材料,2023,56(4):1-6.
LIU Qiang, XING Zhaoliang, ZHOU Changhao, et al. Research progress of BOPP film and its special resin for capacitor[J]. Insulating Materials, 2023, 56(4): 1-6.
- [9] 湛海涯,信建伟,王忠辉.电力电容器用聚丙烯薄膜微观结构对性能的影响研究[J].电力电容器与无功补偿,2025,46(1):45-51.
ZHAN Haiya, XIN Jianwei, WANG Zhonghui. Research on influence of microstructure of polypropylene film of power capacitor on its performance[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 45-51.
- [10] 刘刚,汪鹏,姚成,等.聚丙烯电容膜链结构与表面粗化、物理性能的关系[J].塑料科技,2024,52(2):59-63.
LIU Gang, WANG Peng, YAO Cheng, et al. Relations between chain architecture, surface roughening and physical properties in polypropylene capacitor films[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(2): 59-63.
- [11] 蒋兴良,陈爱军,张志劲,等.盐密和灰密对110 kV复合绝缘子闪络电压的影响[J].中国电机工程学报,2006,(9):150-154.
JIANG Xingliang, CHEN Aijun, ZHANG Zhijin, et al. Effect of both salt and non-soluble deposit densities on flash-

- over voltage of 110 kV composite insulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, (9): 150-154.
- [12] 张永记. 不同盐/灰密下普通绝缘子串交流闪络特性的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [13] DING Liping, ZHANG Xiaoyong, WANG Yanqing. Study on the behavior of BOPP film treated by corona discharge: Coatings[J]., 2020, 10 (12): 1195.
- [14] 电气绝缘用薄膜第3部分: 双轴定向聚丙烯薄膜: GB/T 13542. 3—2006[S]. 2006.
- Insulating films for electrical purposes—Part 3: Biaxially oriented polypropylene films: GB/T 13542.3—2006[S]. 2006.
- [15] 黄锦超, 林锦鸿, 黄少慧. 双轴定向拉伸平膜法生产粗化聚丙烯膜的粗化机理研究[J]. 电力电容器, 2000, (2): 39-42.
- [16] 叶新新, 邢照亮, 姜涛, 等. 聚丙烯洗涤脱灰工艺研究[J]. 化学工业与工程, 2023, 40(4): 122-128.
- YE Xinxin, XING Zhaoliang, JIANG Tao, et al. Research on polypropylene washing - deashing process[J]. Chemical Industry and Engineering, 2023, 40(4): 122-128.
- [17] DU BX, XING JW, RAN ZY, et al. Dielectric and energy storage properties of polypropylene by deashing method for DC polymer film capacitors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28 (6): 1917 - 1924.
- [18] 电气绝缘用薄膜第2部分: 试验方法: GB/T 13542.2—2021[S]. 2021.
- Plastic films for electrical purposes—Part 2: Methods of test: GB/T 13542.2—2021[S]. 2021.
- [19] 左强林, 雷乔舒. 电容器不同介质结构直流和交流试验电压比值的理论研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 29-34.
- ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu. Theoretical study on DC-AC test voltage ratio of different dielectric systems in capacitor [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 29-34.
- [20] 机械工程手册电机工程手册编辑委员会. 电机工程手册第29篇 电力电容器[M]. 北京: 机械工业出版社. 2019.
- [21] 高压并联电容器使用技术条件: DL/T 840—2016[S]. 2016.
- Technical specification for operation of high-voltage shunt capacitors: DL/T 840—2016[S]. 2016.
- [22] Г. С. Кучинский, Н. И. Назаров. Силовые электрические конденсаторы [M]. Москва: Энергоатомиздат, 1992.
- [23] 沈文琪. 对高压并联电容器使用寿命的估算[J]. 电力电容器, 2005, (3): 25-26.
- SHENG Wenqi. Estimation on the expected operation life of high-voltage shunt capacitor[J]. Power Capacitors, 2005, (3): 25-26.

作者简介:

雷乔舒(1979—), 女, 高级工程师, 主要从事电力电容器设计制造工作。E-mail: leijs@sunking-tech。