

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.05.008

基于国产粒子的 BOPP 膜性能测试及高压电容器 试验研究

雷梅梅¹, 刘水平¹, 杨永刚¹, 王英¹, 张文军¹, 姚成², 董海健¹

(1. 西安西电电力电容器有限责任公司, 西安 710082; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663)

摘要: 聚丙烯薄膜是电力电容器核心材料之一,其原材料聚丙烯粒子全部依赖国外进口,为解决这一“卡脖子”问题,近年来多家高校、企业都针对电容器产业链国产化开展了许多研究。本文测试了不同聚丙烯粒子制备的聚丙烯粗化薄膜电气强度、相容性、老化性能等,测试结果表明,国产粒子制备的聚丙烯薄膜与进口粒子制备的聚丙烯薄膜性能相当,在直流电场作用下国产粒子薄膜的击穿场强高于进口粒子薄膜,但分散性较大。基于国产粒子薄膜研制的电容器通过第三方检测机构的试验认证,主要技术指标方面与进口材料电容器性能相当,表明国产粒子制备的聚丙烯粗化薄膜能满足电容器使用需求,有望替代进口粒子实现国产化。

关键词: 国产聚丙烯粒子; 聚丙烯薄膜; 介电强度; 相容性; 老化试验; 电容器

Study on Performance Test of BOPP Film Based on Domestic Particles and Test of High Voltage Capacitor

LEI Meimei¹, LIU Shuiping¹, YANG Yonggang¹, WANG Ying¹, ZHANG Wenjun¹,
YAO Cheng², DONG Haijian¹

(1. Xi'an XD Power Capacitor Co., Ltd., Xi'an 710082, China;

2. China Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Polypropylene film is one of the core materials of power capacitors and its raw material, polypropylene particles, are all imported from abroad. For solving this “stuck neck” problem, many universities and enterprises have carried out many studies in recent years on the localization of the capacitor industry chain. In this paper, the electrical strength, compatibility and aging performance of polypropylene roughened films made of different polypropylene particles are tested and compared. The test results show that the polypropylene films made by the domestic and foreign particles have comparable performance. Under the action of DC electric field, the breakdown field strength of domestic particle films is higher than that of imported particles, but the dispersion is larger. The capacitor based on the domestic particle film has passed the test certification of the third-party testing authority. The main technical indicators are comparable to those of the capacitor produced by the imported particles, indicating that the domestic roughened polypropylene film can meet the application requirements of capacitors and is expected to replace imported particles to achieve full localization.

Keywords: domestic polypropylene particles; polypropylene film; dielectric strength; compatibility; ageing test; capacitor

0 引言

电力电容器是一种重要的基础工业产品^[1],在电力系统、工业领域、高压试验和军事领域应用十分广

泛,主要承担无功补偿、滤除谐波、电压支撑、储能等作用^[2-4]。聚丙烯薄膜是电力电容器核心原材料之一。根据薄膜表面粗糙度和空隙率大小,可分为光膜和粗化膜,其中粗化膜为单面或双面粗糙、空隙率

大于等于 5% 的薄膜^[5],主要用来制作油浸式电容器^[6],用于电力系统无功补偿或无源滤波器等。

与包装级聚丙烯薄膜不同,电容器使用的电工级聚丙烯薄膜属于高端薄膜,要求聚丙烯粒子具有极高的纯净度、较高的等规度、良好的耐温性能和电气绝缘强度等^[7]。目前电工级聚丙烯粒子全部由国外企业供货^[8],国内企业生产的聚丙烯粒子尚不能满足电工膜的需求,存在“卡脖子”问题^[9]。为打破国外企业垄断现状,打造自主可控安全的电容器产业链,近年来多家高校、企业都针对电容器产业链国产化开展了研究^[10-14]。中原石化研制的电容器薄膜用聚丙烯粒子 PPH-FC03,总灰分含量低于 0.003%,等规度达到 98%^[10]。铜峰电子储松潮等人对比了国产化聚丙烯粒子和进口粒子生产的薄膜、电容器性能差异,认为国产化聚丙烯粒子灰分还需进一步下降,结晶度还需提高^[7]。清华大学王昕劼等人对比了不同聚丙烯粒子、不同厂家生产的电容器用聚丙烯薄膜的综合性能,结果显示国产化聚丙烯薄膜仍存在结晶度偏低、薄型膜质量较差的问题^[15],采用国产化聚丙烯薄膜生产的电容器产品性能还需进一步试验验证。

本文对比测试了不同聚丙烯粒子生产的粗化聚丙烯薄膜的电气强度、与苜基甲苯相容性,以及电容器产品的老化性能,并且研制了基于国产聚丙烯粒子的全国产化高压并联电容器,与进口材料电容器主要测试数据进行了对比。

1 电工级聚丙烯粒子和薄膜

聚丙烯(PP)是丙烯通过加聚反应而成的聚合物,化学式(C₃H₆)_n,其外观呈白色,密度 0.90~0.91g/cm³,熔点 164~170℃,是一种性能优良的热塑性合成树脂^[16]。通过双向拉伸工艺生产的聚丙烯薄膜具有质量轻、透明度高、绝缘性能好、机械强度高和耐磨加工性能好等特点,广泛应用于食品、包装、汽车、电子器件等领域^[17]。

电容器用聚丙烯薄膜对原材料聚丙烯粒子的

要求很高,粒子的性能直接影响薄膜的成型、耐温性能、机械性能及绝缘强度等,进而对电容器的整体性能产生影响。电工级聚丙烯粒子主要参数包括灰分含量、熔融指数、等规度等^[18]。灰分反映的是聚丙烯粒子的纯净度,聚丙烯在聚合时通常要添加各类催化剂,会形成 Al、Mg、Ti 等金属杂质残留^[19],这些金属杂质构成聚丙烯薄膜的电弱点,影响薄膜的电气绝缘强度。电工级聚丙烯粒子纯净度要求极高,灰分含量最好在 30 PPM 以下^[20],而国产非电工级聚丙烯粒子灰分含量超过 100 PPM^[7],因此灰分含量是制约电工聚丙烯粒子国产化的关键因素之一^[21]。熔融指数反映的是材料的流动性,对薄膜的加工性能有重要影响,电工级聚丙烯粒子的熔融指数一般控制在 3.0 g/10 min 左右。等规度反映的是等规聚丙烯在整个聚丙烯中的比例,高等规指数使薄膜拉伸强度高、耐热性能好、膜层表面硬度提升,但是不利于薄膜拉伸和加工,容易发生破裂或断裂。

本文所述国产聚丙烯粒子与进口粒子主要参数的对比见表 1。与进口粒子相比,国产粒子熔融指数略低,等规度较高,总灰分不超过 30 PPM,与进口粒子还有一定差距,介电常数与进口粒子基本一致。

表 1 聚丙烯粒子主要参数 Table 1 Main parameters of polypropylene particles			
性能指标	要求值	进口粒子	国产粒子
熔融指数/(g/10 min)	2.8~3.6	3.2	2.8
等规度/%	≥96	96	98
总灰分/PPM	≤30	10~20	< 30
介电常数	2.2±0.2	2.25	2.22

本文研究时选用了同一拉膜厂家生产的 4 种粗化聚丙烯薄膜,薄膜编号、规格及主要参数见表 2。采用国产粒子的聚丙烯薄膜力学性能数据和进口粒子产品差异较大,拉伸强度优于进口粒子产品,断裂伸长率则小于进口粒子产品。电气性能方面,采用国产粒子的聚丙烯薄膜在常温下的介电强度高于进口粒子产品,体积电阻率、介电常数与进口粒子产品差异较小,但介质损耗因数差异较大。

表 2 聚丙烯薄膜主要参数 Table 2 Main parameters of polypropylene film					
项目	要求值	A-1 国产粒子	A-2 进口粒子	A-3 国产粒子	A-4 进口粒子
标称厚度(重量法)/μm	—	11.2	11.2	13.5	13.6
纵向拉伸强度/MPa	≥120	150	156	150	140
横向拉伸强度/MPa	≥130	272	243	282	220
纵向断裂伸长率/%	≥40	106	123	109	121
横向断裂伸长/率%	≥30	43	54	45	49
直流介电强度平均值/(V·μm ⁻¹)	≥520	591	596	608	601
直流介电强度最低值/(V·μm ⁻¹)	≥420	562	542	580	552
体积电阻率/(Ω·m)	≥1.0×10 ¹⁵	8.9×10 ¹⁵	1.4×10 ¹⁶	2.3×10 ¹⁶	2.3×10 ¹⁶
相对介电系数	2.2±0.2	2.28	2.11	2.14	2.15
介质损耗因数	≤3.0×10 ⁻⁴	1.2×10 ⁻⁴	0.8×10 ⁻⁴	1.2×10 ⁻⁴	0.7×10 ⁻⁴

2 试验与结果分析

为了进一步研究国产粒子和进口粒子生产的聚丙烯薄膜性能差异,对表 2 所述的 4 种粗化聚丙烯薄膜进行了电气强度试验、与苪基甲苯相容性试验以及老化试验。

2.1 电气强度试验

依据 GB/T 13542.2—2009,使用 50 点电极法进行直流试验^[22]。通过单层薄膜试样进行试验,把试样放置在上下两个电极之间,控制升压速度为 0.2~1.0 kV/s,连续升压至薄膜击穿,均匀等距离地移动电极,共测量 50 点,记录击穿电压数值。依据标准规定的试验结果分析方法,在 50 个点的测试数据中,去掉 5 个最大值、5 个最小值,计算剩余 40 点的算术平均值,并找出最小值,用标称厚度计算薄膜击穿场强的平均值和最低值。同时,借助威布尔分布对该测试结果进行分析。

按照 GB/T 13542.2—2009 规定的方法计算得到的 4 种薄膜击穿场强平均值和最小值见表 3。结果显示,在直流电场作用下,A-1 和 A-3 两种薄膜击穿场强平均值、最小值均高于 A-2、A-4 两种薄膜。聚丙烯薄膜直流击穿场强的威布尔分布(置信区间为 95%)见图 1,A-1、A-3 两种薄膜的特征击穿场强分别为 627.0 kV/mm 和 629.1 kV/mm,高于 A-2、A-4 两种薄膜的特征击穿场强 582.6 kV/mm 和 603.9 kV/mm。

表3 聚丙烯薄膜的直流击穿场强
Table 3 DC breakdown field strength of polypropylene film

薄膜编号	标称厚度(重量法)/μm	击穿场强/(kV·mm ⁻¹)	
		平均值	最小值
A-1(国产粒子)	11.2	611.2	553.6
A-2(进口粒子)	11.2	544.0	446.4
A-3(国产粒子)	13.5	616.1	570.4
A-4(进口粒子)	13.6	577.6	477.9

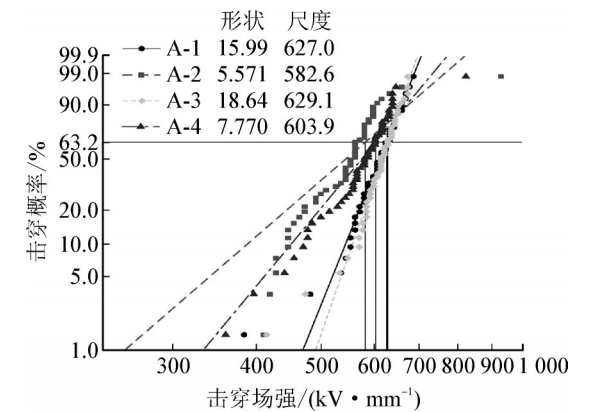


图1 聚丙烯薄膜直流击穿场强的威布尔分布
Fig. 1 Weibull distribution of DC breakdown field strength of polypropylene film

2.2 相容性试验

绝缘油浸渍将使薄膜发生一定程度的溶解和膨胀,薄膜的溶解,不可避免地将杂质带入油中,对绝缘油的电气性能产生影响。薄膜吸油可以填补微小缺陷,提高薄膜性能,但过多吸油会使薄膜过度膨胀,有可能阻塞薄膜间油隙,影响电容器的局部放电性能^[23-24]。因此本试验研究了不同粒子聚丙烯薄膜和苪基甲苯绝缘油的相互作用。

2.2.1 浸渍剂的变化

取 4 种薄膜样品各 1 份,放入盛有苪基甲苯的密封容器中,1 组空白苪基甲苯油样作对比,5 份试样分别编号 Y-1、Y-2、Y-3、Y-4 和 Y-5。5 份试样均放入电热烘箱,烘箱设置为 100℃,保持 96 h。测试试验前和试验后油样的 tanδ、重量、耐压值,其中 tanδ 在不同的电压下进行测试。

试验前后绝缘油重量及耐压变化情况见表 4,根据数据变化情况分析得知,试验结束后,5 份绝缘油试样重量均有所减少,耐压值均降低。试样 Y-5 为无薄膜的空白油样,与试样 Y-5 相比,浸渍薄膜后的试样 Y-1、Y-2、Y-3、Y-4 耐压值降低幅度更大。4 种试样重量变化率相当,耐压值变化率相当,表明国产粒子和进口粒子聚丙烯薄膜对绝缘油的影响没有明显差异。

表4 试验前后绝缘油重量及耐压值变化率
Table 4 Variation rate of insulating oil weight and withstand voltage before and after test

编号	薄膜编号	重量变化率	耐压值变化率
Y-1	A-1(国产粒子)	-0.13%	-63.25%
Y-2	A-2(进口粒子)	-0.35%	-52.73%
Y-3	A-3(国产粒子)	-0.31%	-50.27%
Y-4	A-4(进口粒子)	-0.42%	-64.75%
Y-5	—	-0.23%	-19.40%

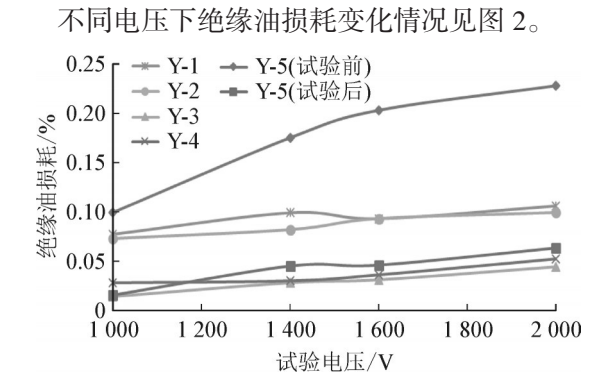


图2 不同电压下绝缘油损耗变化情况
Fig. 2 Variation of insulating oil loss at different voltages

试验前 Y-5 空白油的损耗值最大,试验后空白油样及含薄膜的油样,损耗均有所降低,试验后试

样 Y-1 和 Y-2 损耗为 0.07%~0.1%, 试样 Y-3 和 Y-4 损耗为 0.02%~0.05%, 国产粒子和进口粒子聚丙烯薄膜对绝缘油的影响没有明显差异。

2.2.2 薄膜重量变化

取 4 种薄膜样品各 2 份放入盛有苪基甲苯的密封容器中, 1 份置于室温环境下, 1 份放入烘箱中, 烘箱温度 60℃, 选取测试时间点为: 1 h 后、2 h 后、1 天后、1 周后以及 1 个月后。在规定的测试时间点, 从容器中取出薄膜样品并用无水酒精擦拭干净, 测试薄膜的重量, 分析随着时间推移薄膜的重量变化情况。

薄膜浸油后, 开始是油分子向膜中扩散, 表现为薄膜吸油, 重量增加, 接着膜中非结晶、非等规部分逐渐被溶解; 随着浸渍时间的增加, 吸油和溶解都会逐渐于饱和。在室温条件下, 分子运动缓慢, 温度升高后, 分子运动加剧, 吸油和溶解也加剧。室温和 60℃ 条件下薄膜溶胀后重量变化分别见图 3 和图 4。依据该曲线, 随着时间推移, 国产粒子和进口粒子聚丙烯薄膜重量变化特性基本一致, 未见明显差异。

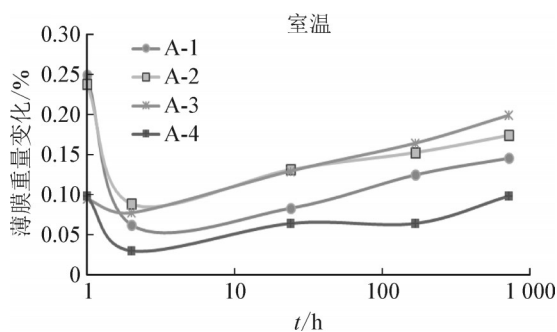


图3 室温下薄膜溶胀后重量变化

Fig. 3 Weight variation of film after swelling at room temperature

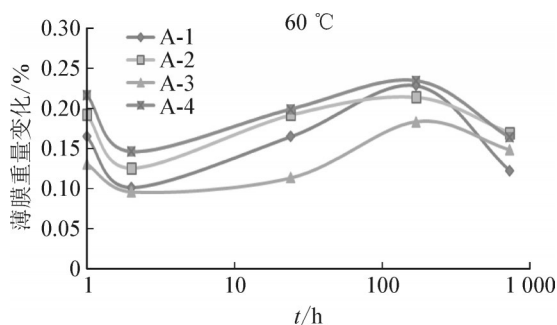


图4 60℃薄膜溶胀后重量变化

Fig. 4 Weight variation of film after swelling at 60℃

2.3 老化试验

设计小容量样机作为老化试验试品, 使用编号 A-3、A-4 的薄膜制作试品各 3 台, 额定电压 4.2 kV, 额定容量 84 kvar, 额定电容 15.2 μF , 设计场强 77.8 kV/mm (按重量法厚度计算, 为电容器设计场强

限值的 1.2 倍以上), 内部元件连接方式 4 串 2 并, 按照正常生产工艺进行试制和生产。

依据 GB/T 11024.2—2019 规定的试验程序^[25], 对 6 台试品进行 1 000 h 老化试验, 试验前后测量电容值并进行对比, 测量介损值 $\tan\delta$ 和局部放电量。试验结束后, 使用直流电源对样机的每个串联段进行击穿试验, 用示波器记录击穿电压值, 升压速率为 400~500 V/s。

老化试验前后电容器电容变化率见图 5, 试验前后电容变化率不大于 2.2%, 没有元件击穿, 表明 6 台试品均通过了 1 000 h 老化试验的考验。国产材料产品电容变化率为 2.0%~2.2%, 进口材料产品电容变化率为 1.2%~1.3%。试验后产品损耗角正切 $\tan\delta$ 小于 0.02%, 局部放电量小于 30 pC, 满足标准要求。

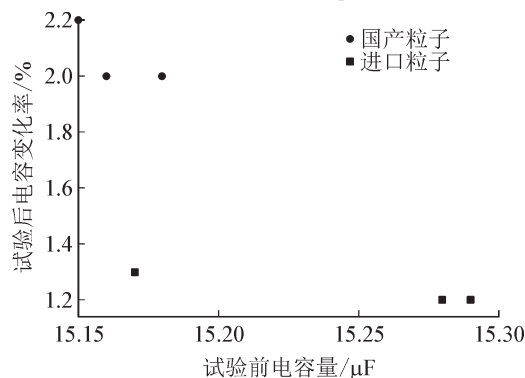


图5 电容器的电容变化率

Fig. 5 Capacitance variation rate of capacitor

电容器元件击穿场强区间图见图 6, 其中击穿场强按重量法厚度计算得到。根据试验结果, 在相同的试验环境下经过 1 000 h 老化试验后, 国产材料电容器元件平均击穿场强为 365.44 kV/mm, 击穿场强最低值为 290.37 kV/mm, 进口材料电容器元件平均击穿场强为 356.67 kV/mm, 击穿场强最低值为 343.70 kV/mm。经过老化试验后, 国产粒子生产的聚丙烯薄膜的击穿场强略高于进口粒子, 但分散性较大。

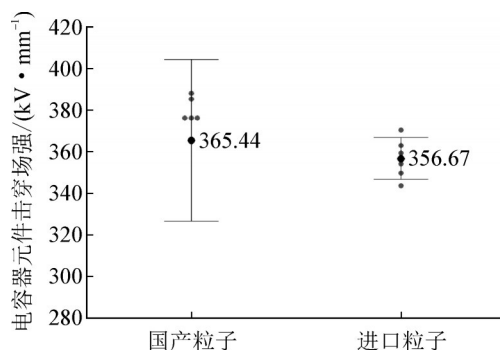


图6 电容器元件击穿场强区间图

Fig. 6 Breakdown field strength interval diagram of capacitor element

3 产品验证与应用

基于国产聚丙烯粒子,研制了 BAM11/ $\sqrt{3}$ - 334-1W 型全国产化高压并联电容器,在第三方检测试验机构通过了型式试验和老化试验,与进口材料电容器主要测试数据对比见表 7。试验数据显示,两种电容器产品在电容偏差、损耗角正切、最热点温度等技术指标方面性能相当,产品均通过了 1 700 次过电压周期试验和 1.4 U_n 、1 000 h 老化试验的考核。

目前,同样的产品正在某变电站挂网运行。

表5 电容器试验测试数据(部分)
Table 5 Test data (partially) of capacitor

项目	要求值	电容器实测值	
		国产材料	进口材料
电容量测试/%	-1~4	0.15	1.25
损耗角正切/%	≤0.02	0.015 6	0.016 4
心子最热点 温度/℃	≤80	73.5	74.2
高温下损耗 角正切/%	≤0.02	0.012 0	0.013 4
过电压 试验	2.15 U_n /1 700 次;1.4 U_n ,96 h	2.15 U_n /1 700 次;1.4 U_n ,96 h	2.15 U_n /1 700 次;1.4 U_n ,96 h
老化试验	1.4 U_n /1 000 h	1.4 U_n /1 000 h	1.4 U_n /1 000 h

4 结语

本文测试了不同聚丙烯粒子制备的粗化聚丙烯薄膜电气强度、与苣基甲苯相容性,以及电容器产品的老化性能,并且研制了基于国产聚丙烯粒子的全国产化高压并联电容器,得出如下结论:

1)电气强度试验结果显示国产粒子制备的聚丙烯粗化薄膜的直流击穿场强高于进口粒子。国产粒子和进口粒子制备的聚丙烯薄膜对绝缘油的影响没有明显差异,吸油后聚丙烯薄膜重量变化特性基本一致,未见明显差异。老化试验后,国产粒子聚丙烯薄膜的平均击穿场强略高于进口粒子,但分散性较大;

2)研制的基于国产聚丙烯粒子的高压并联电容器主要性能指标与进口材料制备的电容器在电容偏差、损耗角正切、最热点温度等技术指标方面性能相当,产品通过了 1 700 次过电压试验以及 1.4 U_n 、1 000 h 老化试验考核。

现有研究结果表明,国产粗化聚丙烯薄膜能满足电容器使用需求,有望替代进口粒子实现全国产化。当然,目前的研究尚无法充分证明国产电工膜用聚丙烯粒子的可用性和可靠性,工程应用中关注的产品寿

命和一致性等问题,还需要在工程中批量化应用得以验证。后续研究工作应聚焦于不同应用场景的电容器研制,以及小批量挂网运行测试,为国产粒子聚丙烯粗化薄膜全面推广应用积累更多数据。

参考文献

[1] 房金兰. 我国电力电容器技术的发展[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(1): 1-48.
FANG Jinlan. Development of power capacitor technology in China[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(1): 1-48.

[2] 刘水平. 高压直流输电用电容器及装置的技术进步[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 39(1): 7-9.
LIU Shuiping. The technology advancement of capacitors and installations for HVDC transmission projects[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008, 39(1): 7-9.

[3] 芦锋. 6 kV 节能型雪橇式无功自动补偿装置的研制[C]// 2018 电网节能与电能质量技术论文集, 陕西省电网节能与电能质量技术学会.

[4] 李维维, 高琪, 刘水平. 小型脉冲功率装置用特种脉冲电容器研发及应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 86-91.
LI Weiwei, GAO Qi, LIU Shuiping. Research and application of special pulse capacitor for small pulse power device[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 86-91.

[5] 王丽新. 我国聚丙烯电工薄膜的生产现状及国产化建议[J]. 化工新型材料, 2001, 29(8): 40-42.
WANG Lixin. The production status of polypropylene electrical film and suggestions on developing raw materials in China[J]. New Chemical Materials, 2001, 29(8): 40-42.

[6] 储松潮, 常庆阳, 吴建章, 等. 高场强 BOPP 粗化膜的研究和开发[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(1): 65-68.
CHU Songchao, CHANG Qingyang, WU Jianzhang, et al. Research and development on biaxially oriented polypropylene rough-surface film with high field strength[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(1): 65-68.

[7] 储松潮, 黄云锴, 潘毓娴, 等. 电工级聚丙烯粒子国产化及其薄膜和电容器研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(5): 64-69.
CHU Songchao, HUANG Yunkai, PAN Yuxian, et al. Study on localization of electrical grade polypropylene granule and its film and capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(5): 64-69.

[8] 徐辉, 张丕生, 陈豹, 等. 电工膜用高纯聚丙烯树脂的现状[J]. 河南化工, 2021, 38(5): 18-21.
XU Hui, ZHANG Pisheng, CHEN Bao, et al. Present situation of high purity polypropylene resin for electrical film[J].

- Henan Chemical Industry, 2021, 38(5): 18-21.
- [9] 黄传兵, 祝志东, 邓兆敬. 电容器薄膜用聚丙烯树脂的发展现状[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 27-34.
HUANG Chuanbing, ZHU Zhidong, DENG Zhaojing. Development status of polypropylene resin for capacitor film[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 27-34.
- [10] 张丕生, 孙福国, 徐辉, 等. 电容器薄膜用聚丙烯的生产现状[J]. 合成树脂及塑料, 2021, 38(3): 59-63.
ZHANG Pisheng, SUN Fuguo, XU Hui, et al. Production status of PP for capacitor films[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2021, 38(3): 59-63.
- [11] 曹春鹏, 赵星月, 李涵, 等. 丙烯等规配位聚合催化剂及电容器膜基材 iPP 的制备技术研究进展[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 15-26.
CAO Chunpeng, ZHAO Xingyue, LI Han, et al. Research progress on preparation technology of catalysts for propylene isotactic coordination polymerization and iPP for capacitor film substrate material[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 15-26.
- [12] 孙朦, 龙厚尹, 柏潇, 等. 电介质聚丙烯薄膜晶体结构研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 56-62.
SUN Meng, LONG Houyin, BAI Xiao, et al. Study on crystal structure of dielectric polypropylene films[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 56-62.
- [13] 宋家乐, 张添胤, 朱光宇, 等. 热-应力老化作用对电容器用 BOPP 薄膜绝缘性能的影响[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 83-87.
SONG Jiale, ZHANG Tianyin, ZHU Guangyu, et al. Influence of thermal-stress aging on insulation performance of BOPP film for capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 83-87.
- [14] 党智敏. 干式直流电容器全链条国产化关键技术探讨[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 1-14.
DANG Zhimin. Discussion on key technology for localization of full-chain of dry DC capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 1-14.
- [15] 王昕劼, 黄磊, 王健涛, 等. 电容器用超净聚丙烯薄膜综合性能比较[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 49-55.
WANG Xinjie, HUANG Lei, WANG Jiantao, et al. Comprehensive performance comparison of ultraclean polypropylene film for capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 49-55.
- [16] 李兆林, 陈松, 李贤君. 聚丙烯树脂对薄膜应用性能的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(1): 60-63.
LI Zhaolin, CHEN Song, LI Xianjun. Study of influence of polypropylene resin on application performance of film[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(1): 60-63.
- [17] 唐青松. 国内聚丙烯行业发展现状与市场分析[J]. 现代经济信息, 2018(27): 360-361.
- [18] 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.
- [19] 权志杰, 常诚, 段金汤, 等. 电容器薄膜用聚丙烯原料微量元素分析方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 35-40.
QUAN Zhijie, CHANG Cheng, DUAN Jintang, et al. Trace elements analysis method of polypropylene raw materials for capacitor film[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 35-40.
- [20] 王光华. 聚丙烯电工膜料技术概述及市场分析[J]. 石化技术, 2021, 28(9): 200-201.
- [21] 周昌浩, 邢照亮, 姜涛, 等. 电工膜用高纯聚丙烯脱灰技术研究[J]. 化学工业与工程, 2024, 41(1): 103-110.
ZHOU Changhao, XING Zhaoliang, JIANG Tao, et al. Deashing technology of high purity polypropylene for electrical film[J]. Chemical Industry and Engineering, 2024, 41(1): 103-110.
- [22] 电气绝缘用薄膜第2部分: 试验方法: GB/T 13542. 2—2009[S]. 2009.
Film for electrical insulation-Part 2: Methods of test: GB/T 13542. 2—2009[S]. 2009.
- [23] 王友功, 李丽琴, 常宪民, 等. 聚丙烯薄膜与绝缘油相容性的试验研究[J]. 电力电容器, 1984(3): 10-17.
- [24] 宋明兰. 电工用聚丙烯薄膜与烷基苯, 硅油的相容性[J]. 电力电容器, 1983(2): 25-28.
- [25] 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.
- 作者简介:**
雷梅梅(1988—), 女, 工程师, 主要从事电力电容器产品研究和设计工作。
刘水平(1965—), 男, 正高级工程师, 主要从事电力电容器及互感器技术工作。
杨永刚(1988—), 男, 工程师, 主要从事电容式电压互感器及套管式电容器产品的设计开发工作。
王英(1983—), 女, 工程师, 主要从事电力电容器产品研究和设计工作。
张文军(1983—), 男, 工程师, 主要从事电力电容器及无功补偿技术等技术工作。
姚成(1981—), 男, 高级工程师, 从事电力电容器及其装置的研发与故障诊断等工作。
董海健(1972—), 男, 高级工程师, 主要从事电力电容器及无功补偿技术等研究开发工作。