

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.01.008

电力电容器用聚丙烯薄膜微观结构对性能的影响研究

湛海涯, 信建伟, 王忠辉

(西安西电电力电容器有限责任公司, 西安 710082)

摘要: 由于聚丙烯薄膜具有较高的机械性能和较优良的电气性能,使其在电气装置上广泛应用。为了便于用聚丙烯薄膜制备的电气装置在极端环境(例如高温)下正常使用,提高聚丙烯薄膜的耐高温及其它理化电气性能是十分必要的。影响聚丙烯薄膜耐高温及其它理化电气性能的因素有很多,本文以聚丙烯薄膜的微观因素(含等规度)作为研究对象,主要目的是研究微观因素(含等规度)对薄膜性能的影响,为电力电容器性能的改进提供试验数据支撑。

关键词: 聚丙烯薄膜; 微观因素; 等规度; 电气性能; 理化性能

Research on Influence of Microstructure of Polypropylene Film of Power Capacitor on Its Performance

ZHAN Haiya, XIN Jianwei, WANG Zhonghui

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

Abstract: Polypropylene film is used widely in electric devices due to its higher mechanical and better electrical properties. It is necessary to improve the high temperature resistance and other physical as well as chemical electrical properties of the polypropylene film in order to keep the electric devices made of polypropylene film to be used in extreme environments (such as high temperature). However, there are many factors influencing the high temperature resistance and other physical as well as chemical electrical properties of polypropylene film. In this paper, the micro-factors (including the isotacticity) of the polypropylene film is taken as the research object with purpose of researching the influence of the micro-factors (including the isotacticity) on the properties of the polypropylene film and providing test data support for performance improvement of power capacitor.

Keywords: polypropylene film; micro-factors; isotacticity; electrical property; physical and chemical property

0 引言

电力电容器固体介质在经历了由绝缘纸到膜纸复合再到全膜的多年发展,已经成为一种近乎成熟的电力产品。在目前的使用场合及制造水平下,聚丙烯薄膜因其具有较高的击穿电压、较小的介质损耗而被广泛应用于电力电容器的制造中^[1]。近年来,伴随着国家电网建设项目的大力推进,使用环境的苛刻程度加大,这就致使电力电容器耐电强度、耐高温性能等要求在不断提高。而作为提高电力电容器性能的关键原材料—聚丙烯薄膜,在新的挑战下也需做出相应的性能提高。

依据现有研究,从宏观角度看,薄膜制备工艺

会对聚丙烯薄膜的性能产生一定影响。例如薄膜拉伸定型工艺中横纵向拉伸力、拉伸温度和热定型温度会影响薄膜的热收缩率,微量成核剂的添加会影响薄膜的结晶度等^[2]。

本文从微观因素(含等规度)对聚丙烯薄膜性能的影响入手进行系统研究,为聚丙烯薄膜性能的改进找到切入点。以期电力电容器性能的提高提供试验数据支撑。

1 样品及试验简介

1.1 样品

样本统一来源于国内某聚丙烯薄膜生产厂家,取样方式为随机抽取。样品规格如下:

1) RP0.006×355 mm(单面粗化厚度为 6 μm, 宽度为 355 mm 的双向拉伸聚丙烯薄膜, 树脂粒子等规度 95%~96%), 以下简称 RP6 μm。

2) RRP0.008×355 mm(双面粗化厚度为 8 μm, 宽度为 355 mm 的双向拉伸聚丙烯薄膜, 树脂粒子等规度 95%~96%), 以下简称 RRP8 μm。

3) 普通电晕膜 MP6D×620 mm(无粗化, 厚度为 6 μm, 宽度为 620 mm 的电晕处理的非耐高温聚丙烯薄膜, 树脂粒子等规度 95%~96%), 以下简称 MP6D。

4) 耐高温电晕膜 HMP8D×620 mm(无粗化, 厚度为 8 μm, 宽度为 620 mm 的电晕处理的耐高温聚丙烯薄膜, 树脂粒子等规度 98% 以上), 以下简称 HMP8D。

说明: 1) 粗化膜和普通电晕膜的树脂等规度虽都为 95%~96%, 但并不是完全相同的树脂, 主要差异是粗化膜的树脂里抗氧化剂较普通电晕膜的树脂里含量少, 且粗化膜树脂里还含有利于粗化的添加剂^[9], 其中抗氧化剂和添加剂薄膜厂家保密; 2) 薄膜的电晕处理^[10]: 原理是在电极上施加高频电压, 使电极相邻的薄膜处理面的空气电离放电, 气体电离的高能粒子在强电场的作用下快速冲击薄膜, 使表层分子链的化学键断裂而产生极性。极性的产生则会有利于下一步工序电极的蒸渡; 3) 等规聚丙烯, 分子链上的甲基规整的排列在主链(碳链)的同一侧, 而甲基排列在同一侧的数量占所有甲基的百分比即为等规度; 4) 粗化膜用于油浸电力电容器, 电晕膜用于干式电力电容器绝缘薄膜的基膜。

1.2 试验简介

本研究针对上面介绍的 4 种规格展开, 依据国家标准 GB/T 13542—2021《电气绝缘用薄膜》^[9]进行试验, 研究与试验的主要内容如下:

- 1) 厚度(μm, 叠层法厚度和重量法厚度);
- 2) 空隙率(%);
- 3) 表面粗糙度 Ra (μm);
- 4) 薄膜表面结构(光学显微镜);
- 5) 拉伸强度(MPa, 横向和纵向拉伸强度);
- 6) 断裂伸长率(%, 横向和纵向断裂伸长率);
- 7) 介电强度(V/μm, 直流介电强度);
- 8) 收缩率(%, 横向和纵向收缩率);
- 9) 熔点(°C)
- 10) 结晶度(%)

2 聚丙烯分子链的等规度简介

聚丙烯(polypropylene, PP)是以丙烯为单体聚合而成的聚合物, 其结构式为 $[\text{CH}_2\text{CHCH}_3]_n$ 。从结构上可分为等规聚丙烯(isotactic polypropylene, iPP)、

间规聚丙烯(syndiotactic polypropylene, SPP)和无规聚丙烯(atactic polypropylene, APP)3 种。聚丙烯是结晶性材料, 其综合性能主要由分子链立体等规结构、结晶晶型、结晶度等决定。聚丙烯主链上含有不对称碳原子, 其叔碳上的甲基在空间上有不同的排列方式。甲基排列在分子主链的同一侧称等规聚丙烯, 若甲基无秩序的排列在分子主链的两侧称无规聚丙烯, 当甲基交替排列在分子主链的两侧称间规聚丙烯。其结构见图 1^[6]。

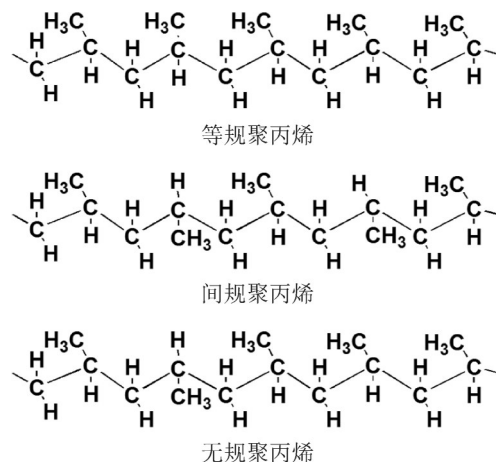


图1 3种不同立体结构的聚丙烯
Fig. 1 Polypropylene with three different stereoscopic structures

等规度是描述有规异构所占比例的物理量, 即有规异构体占有全部高分子的百分数。聚丙烯的等规度与结晶度、粗糙度、耐电强度等性能都有着密切联系, 具体将通过试验进行介绍。

3 聚丙烯薄膜理化性能试验

3.1 厚度和空隙率

厚度的测量采用两种方法: 叠层法和重量法。每种规格的薄膜随机抽取 4 个样品, 测量方法执行标准 GB/T 13542.2—2021。

薄膜的叠层法厚度测量值见表 1, 聚丙烯薄膜叠层法厚度区间图见图 2。由表 1 和图 2, 可以看出, 4 种规格的聚丙烯薄膜的厚度偏差都在允许范围(-1.5~+2.5)% 内, 均为正偏差。图 2 中 RP6 μm 的叠层法厚度置信区间为(5.974 70, 6.040 30)、MP6D 的叠层法厚度置信区间为(6.014 96, 6.095 04)、RRP8 μm 的叠层法厚度置信区间为(8.084 96, 8.165 04)、HMP8D 的叠层法厚度置信区间为(8.043 85, 8.161 15)。4 种规格薄膜厚度均匀性控制能力依次为: RP6 μm>MP6D=RRP8 μm>HMP8D, 同等厚度的薄膜粗化膜的厚度均匀性控制能力优于电晕膜, 其中等规度最高的 HMP8D 耐高温薄膜厚度均匀性最差。

表1 薄膜的叠层法厚度测量值

Table 1 Laminated thickness measurement value of film

规格	厚度测量值/ μm				平均值/ μm	偏差/%
	样品	样品	样品	样品		
	1号	2号	3号	4号		
RP6 μm	6.01	8.09	6.06	8.06	6.01	0.2
RRP8 μm	8.09	8.13	8.13	8.15	8.13	1.6
MP6D	6.06	6.02	6.06	6.08	6.06	1.0
HMP8D	8.06	8.15	8.10	8.10	8.10	1.3

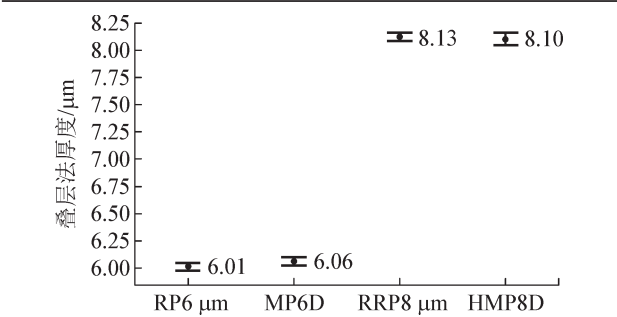


图2 聚丙烯薄膜叠层法厚度区间图

Fig. 2 Thickness interval diagram of polypropylene film laminated method

3.1.1 重量法厚度

对4种规格的薄膜进行了重量法的厚度测量,具体数据见表2。聚丙烯薄膜重法厚度区间图见图3。

表2 薄膜的重量法厚度测量值

Table 2 Gravimetric thickness measurement of the film

规格	厚度测量值/ μm				平均值/ μm
	样品	样品	样品	样品	
	1号	2号	3号	4号	
RP6 μm	5.55	5.51	5.55	5.59	5.55
RRP8 μm	7.40	7.46	7.48	7.54	7.47
MP6D	5.81	5.75	5.81	5.87	5.81
HMP8D	7.69	7.84	7.75	7.76	7.76

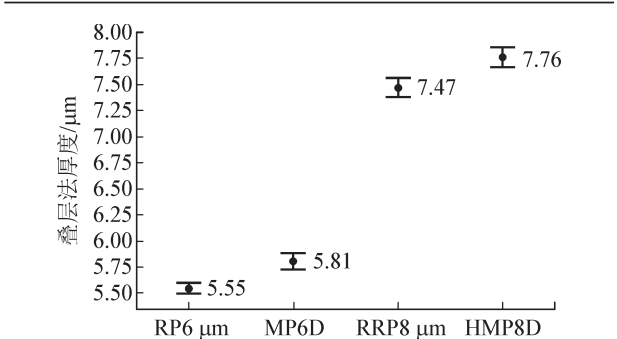


图3 聚丙烯薄膜重法厚度区间图

Fig. 3 Gravimetric thickness interval of polypropylene film

图3中RP6 μm 的重量法厚度置信区间为(5.498 03,5.601 97)、MP6D的重量法厚度置信区间为(5.73205,5.887 95)、RRP8 μm 的重量法厚度置信区间为(7.378 13,7.561 87)、HMP8D的重量法厚度置信区间为(7.661 91,7.858 09)。4种规格薄膜

重量法厚度均匀性控制能力依次为:RP6 μm > MP6D > RRP8 μm > HMP8D,同等厚度的薄膜粗化膜的厚度均匀性控制能力优于电晕膜,其中等规度最高的HMP8D耐高温薄膜厚度均匀性最差。

3.1.2 空隙率

空隙率的定义、试验方法及数据统计参照国标GB/T 13542.2《电气绝缘用薄膜第2部分 试验方法》。聚丙烯薄膜的空隙率见表3。

表3 聚丙烯薄膜的空隙率

Table 3 Porosity rate of polypropylene film

规格	空隙率/%				平均值/%
	样品	样品	样品	样品	
	1号	2号	3号	4号	
RP6 μm	8.28	8.52	8.28	7.87	8.24
RRP8 μm	9.32	8.98	8.69	8.09	8.77
MP6D	4.30	4.33	4.30	3.93	4.22
HMP8D	4.81	3.95	4.52	4.38	4.41

从表3中可以看出,对于粗化膜RP6 μm 及RRP8 μm 空隙率分别为8.24和8.77,都在标准允许范围(6~10.5)%之内。而对于电晕膜,标准对其空隙率无要求,但其仍存在一定的空隙率,原因是任何一种聚丙烯薄膜的表面都不是绝对光滑的,微观表面都存在一定的沟槽,沟槽是由聚丙烯 α 和 β 晶型转化产生的,只是程度上存在差异。从4种规格薄膜的空隙率数据可以看出,粗化膜的空隙率大于电晕膜。

3.1.3 厚度和空隙率小结

首先,从试验结果可以看出,每种薄膜的厚度及空隙率的试验结果都符合标准要求。

其次,本研究侧重点是等规度对薄膜性能的影响,在本节中,等规度影响厚度的均匀性,具体如下:等规度为结晶和定向拉伸薄膜提供高的机械和电气强度,BOPP薄膜之所以具有目前的性能是因为聚丙烯分子等规度达到95%~96%,但如果等规度继续提高,就会使薄膜的厚薄均匀性变差,在试验结果中也有所反映,等规度最高的HMP8D(树脂等规度98%以上)厚度均匀性最差,这是因为等规度越高,结晶性就越强,这样将使生产薄膜时厚片的结晶数目与尺寸有所增加,就会使应力分布不均,在拉伸成膜时就会对厚度均匀性带来不利^[7-9]。

3.2 表面粗糙度以及薄膜表面结构

3.2.1 表面粗糙度

使用全自动数显粗糙度测试仪(型号Mar Surf PS1,测量范围:-200 μm ~150 μm)将4种规格的薄膜按照标准进行表面测量,读取Ra值,具体数值见表4,聚丙烯薄膜的粗糙度的区间图见图4。

表4 聚丙烯薄膜的粗糙度(Ra)
Table 4 Roughness of polypropylene film (Ra)

规格	Ra/ μm				Ra 平均值/ μm
	样品 1号	样品 2号	样品 3号	样品 4号	
RP6 μm A 面	0.208	0.189	0.184	0.190	0.192
RP6 μm B 面	0.257	0.222	0.218	0.203	0.225
RRP8 μm A 面	0.212	0.234	0.239	0.218	0.223
RRP8 μm B 面	0.299	0.353	0.354	0.284	0.323
MP6DA 面	0.078	0.070	0.084	0.081	0.079
MP6DB 面	0.069	0.071	0.069	0.076	0.072
HMP8DA 面	0.097	0.093	0.099	0.105	0.100
HMP8DB 面	0.108	0.117	0.102	0.109	0.109

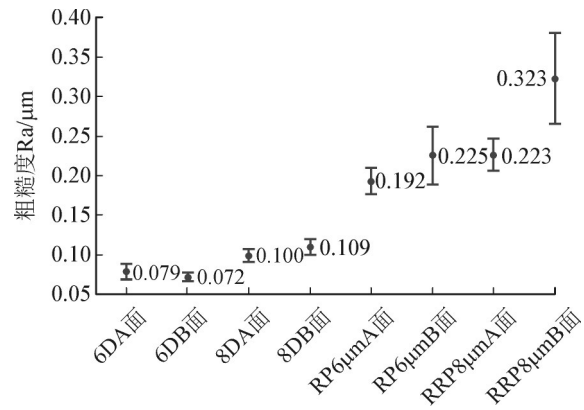


图4 聚丙烯薄膜粗糙度的区间图
Fig. 4 Roughness interval diagram of polypropylene film

结合表4与图4,可以看出粗化膜的粗糙度大于电晕膜,双面粗化薄膜的粗糙度大于单面粗化薄膜的粗糙度。电晕膜对粗糙度无任何要求,之所以会有0.070~0.100左右的粗糙度存在,是因为聚丙烯分子 β 晶型向 α 晶型的转化不能100%进行产生的^[10-11]。

3.2.2 微观表面结构

对于粗糙度的描述还可以从微观结构图上直观的反应,为此对4种规格薄膜的A面及B面用光学电镜放大50倍进行了观察,具体见图5。可以看到粗化膜的粗糙程度,表面沟槽明显大于电晕膜。

3.2.3 粗糙度以及薄膜表面结构小结

首先,从试验结果可以看出,每种薄膜的粗糙度的试验结果都符合标准要求。其次,粗化膜的粗糙度主要是通过铸片时利用温度控制生成大量 β 晶型,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,即粗化^[12]。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^[13]。

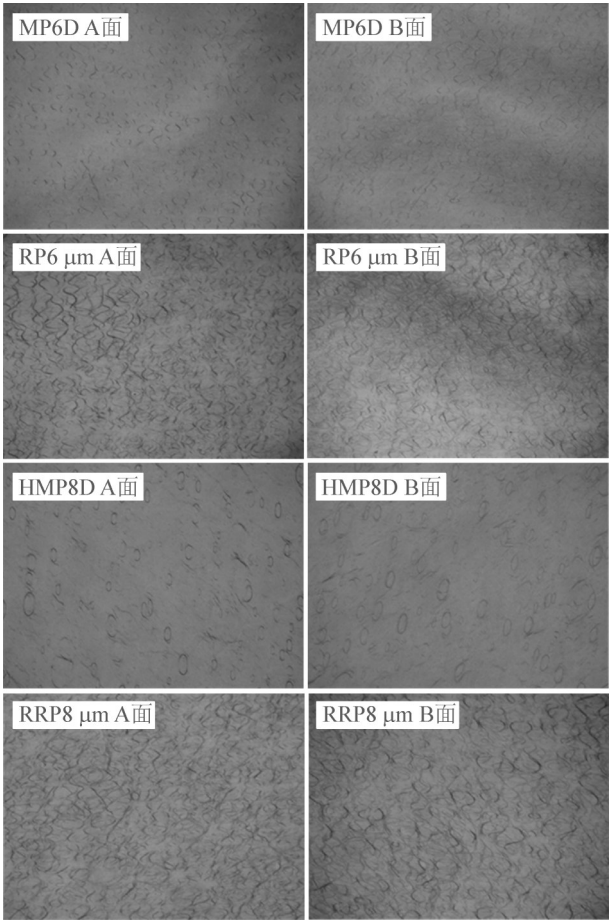


图5 聚丙烯薄膜表面微观结构图
Fig. 5 Microstructure diagram of polypropylene film surface

3.3 拉伸强度和断裂伸长率

聚丙烯薄膜断裂伸长率及拉伸强度见表5。从表5可以看出,4种规格薄膜都达到标准要求。从表中可以看到,电晕膜的拉伸强度及断裂伸长率均大于粗化膜的,原因是薄膜粗化程度大,表面沟槽多,有效厚度小,且不平整程度高,故而拉伸强度小。而HMP8D在4种薄膜中拉伸强度及断裂伸长率是最大的,原因是聚丙烯分子等规度高,分子链排列规整,拉伸强度也得到提高^[14-15]。

表5 聚丙烯薄膜断裂伸长率及拉伸强度
Table 5 Breakage elongation and tensile strength of polypropylene film

规格	断裂伸长率 (横)/%	拉伸强度 (横)/MPa	断裂伸长率 (纵)/%	拉伸强度 (纵)/MPa
RP6 μm	33	216	125	121
RRP8 μm	34	218	124	124
MP6D	42	241	134	131
HMP8D	52	252	154	143

3.4 热收缩率

3.4.1 横向及纵向热收缩率

本试验为了研究在不同温度下薄膜的热收缩

情况,选取的温度点共9个,分别是80℃、85℃、90℃、95℃、100℃、105℃、110℃、115℃和120℃。聚丙烯薄膜纵向热收缩率试验结果见图6-7。

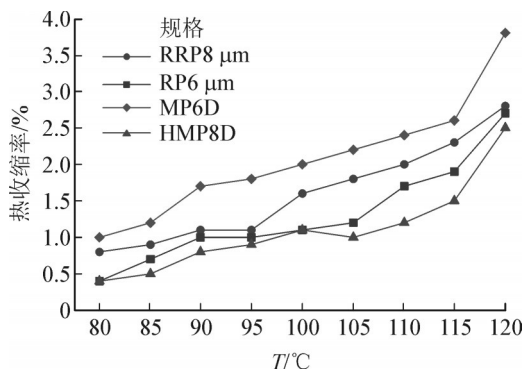


图6 聚丙烯薄膜纵向热收缩率

Fig. 6 Longitudinal thermal shrinkage rate of polypropylene film

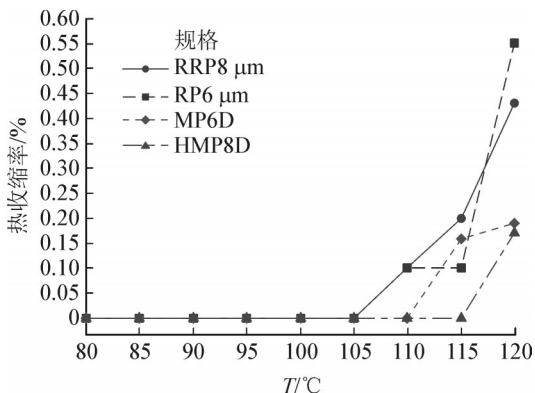


图7 聚丙烯薄膜横向热收缩率

Fig. 7 Lateral thermal shrinkage rate of polypropylene film

图6显示,4种规格的薄膜的热收缩率的大小如下: $HMP8D < RP6 \mu m < RRP8 \mu m < MP6D$ 。图7显示,薄膜横向在 $\leq 105^\circ C$ 时都没有发生热收缩, $RRP8 \mu m$ 和 $RP6 \mu m$ 薄膜在 $110^\circ C$ 发生热收缩, $MP6D$ 在 $115^\circ C$ 发生热收缩,而其中 $HMP8D$ 薄膜更是在 $120^\circ C$ 才发生横向热收缩。热收缩率的大小如下: $HMP8D < RP6 \mu m < RRP8 \mu m < MP6D$ 。

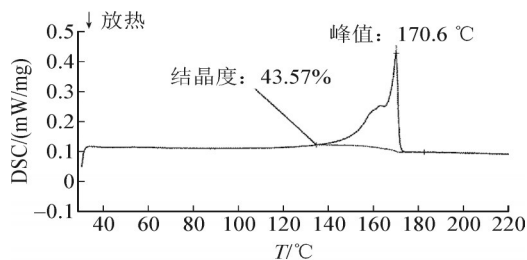
3.4.2 热收缩率小结

从不同温度下的热收缩试验结果可以看出, $HMP8D$ 薄膜的热收缩率最小,即其耐高温性能最好,而 $HMP8D$ 薄膜的等规度是最高的。等规度对薄膜的耐高温性能影响如下,等规度越高,耐高温性能越好。原因是等规度高,则聚丙烯分子链排列规整,结晶度高。聚丙烯是具有较大取代基的高分子链,采取螺旋形构象,在晶体紧密堆积时,采取中心轴互相平行的方式排列,高分子一旦结晶,排列在晶相中的高分子链的构象就不再改变。如果聚

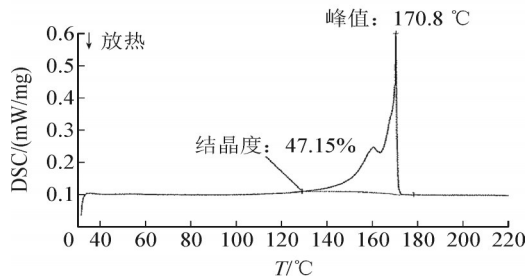
合物的主链结构规整性高,高分子链能结晶、造成分子的紧密集聚,增强了分子间的作用力,内部分子链的相对位置不易发生移动,因而其耐高温性能得到提高^[16-17]。另在薄膜生产过程中,纵向实施的拉力远大于横向,致使纵向聚丙烯分子链的等规度降低,分子间作用力较横向弱,最终导致纵向收缩率远大于横向收缩率^[18]。

3.5 结晶度和熔点

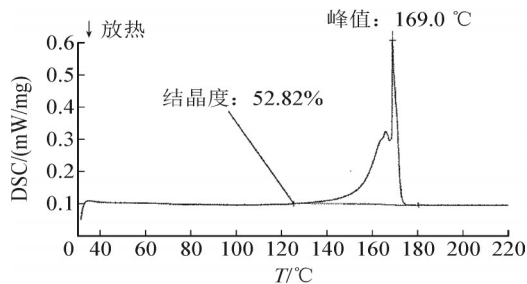
本研究中结晶度及熔点均采用热分析方法-差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)进行测量。图8是4种规格薄膜的DSC曲线,从中可以读取所需的结晶度及熔点信息,具体见表6。



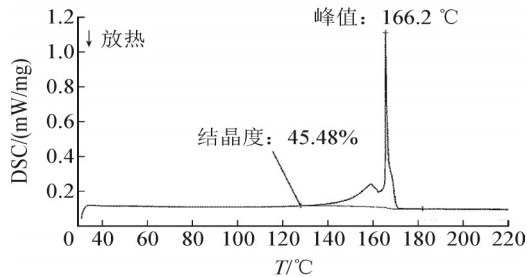
(a) $RP6 \mu m$



(b) $RRD8 \mu m$



(c) $HMP8P$



(d) $MP6D$

图8 聚丙烯薄膜的DSC曲线

Fig. 8 DSC curve of polypropylene film

表6 聚丙烯薄膜的熔点与结晶度
Table 6 Melting point and crystallinity of polypropylene film

规格	熔点/℃	结晶度/%
RP6 μm	170.6	43.57
RRP8 μm	170.8	47.15
MP6D	166.2	45.48
HMP8D	169.0	52.82

图8的DSC曲线显示,等规度最高的HMP8D薄膜具有最高的结晶度。结晶度用来表示聚合物中结晶区域所占的比例,结晶是分子链在空间上的一种有序排列。聚丙烯分子中取代基团的对称性直接影响薄膜的结晶^[19-20]。

聚丙烯薄膜在纵向和横向拉伸过程中的分子取向无法做到完全的规整排列,薄膜中存在晶区和非晶区,非晶区域给薄膜的热收缩提供了空间。因此,提高薄膜耐温性能的关键是提高薄膜的结晶度、使薄膜中的分子排列规整、减少非晶区。而聚丙烯分子中取代基团的对称性直接影响薄膜的结晶,因此如果要提高聚丙烯的结晶度,首先要提高聚丙烯树脂粒子的等规度,因为等规度高,聚丙烯分子中取代基团的对称性高^[21-22]。聚合物普遍适用的规则同样适合聚丙烯。分子链排列规整,结晶力高,分子间作用力强,融化温度高。

4 薄膜电气性能试验

依据标准 GB/T 13542—2021 对薄膜进行 50 点直流介电强度试验,在 50 个试验数据中,分别去掉最低和最高的 5 个数据,其余 40 点在置信区间为 95% 的条件下,运用威布尔分布作图,聚丙烯薄膜的直流介电强度威布尔图见图 9,具体数值见表 7。

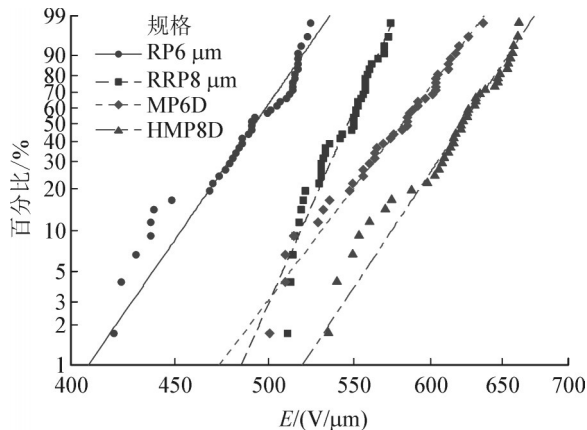


图9 聚丙烯薄膜的直流介电强度威布尔图
Fig. 9 Weibull diagram of DC dielectric strength of polypropylene film

表7 聚丙烯薄膜的直流介电强度
Table 7 DC dielectric strength of polypropylene film

规格	介电强度最小值 (40点)/(V/μm)	介电强度平均值 (40点)/(V/μm)
RP6 μm	420	487
RRP8 μm	511	543
MP6D	500	576
HMP8D	535	616

结合图9和表7可以看出,4种规格的薄膜介电强度均满足标准要求, $E_{MP6D} > E_{RP6\mu m} > E_{HMP8D} > E_{RRP8\mu m}$ 。其中HMP8D的介电强度最大。电晕膜的介电强度高于粗化膜,原因是粗化膜表面的沟槽,使其有效厚度降低。而等规度高的HMP8D薄膜介电强度最大,是因为聚丙烯分子等规度高的分子链排列规整,晶体结构趋于完善而稳定,需要更高的电压来提供能量才能达到击穿的目的^[23-25]。

5 结语

本文对4种不同规格的聚丙烯薄膜进行了多维度对比表征测量,研究了其微观形态对薄膜性能的影响。微观的切入点更能将理论与宏观呈现的性能有效地结合。本文结合微观视角,更好地诠释了提高等规度对薄膜的拉伸强度、耐高温性能及介电强度等性能都有积极的影响。

但将目前广泛应用的油浸电力电容器用聚丙烯薄膜的等规度进一步提高,还有如下问题待研究解决:高等规度的薄膜和浸渍剂的相容性待提高;薄膜生产过程中等规度高的聚丙烯在拉伸时极易出现破膜的状况,工艺待改进。如若上述问题得到解决,电力电容器薄膜的质量与性能将提升、适用环境及领域将拓展^[26]。

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): 1-4.
FANG Jinlan. Development of power capacitor technology in China[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(1): 1-4.
[2] 胡小忠,柳和生,赖家美. 聚丙烯薄膜的双向拉伸工艺研究[J]. 橡塑技术与装备, 2004, 30(4): 13-18.
HU Xiaozhong, LIU Hesheng, LAI Jiamei. Study on biaxially oriented pulling process of polypropylene film[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2004, 30(4): 13-18.
[3] 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.
- [4] 周先进,赵燕,麦建国. BOPP薄膜电晕处理及效果研究[J]. 现代塑料加工应用,2004, 16(4):25-27.
ZHOU Xianjin, ZHAO Yan, MAI Jianguo. Study on corona effect and treatment of BOPP film[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2004, 16(4): 25-27.
- [5] 电气绝缘用薄膜第2部分:试验方法:GB/T 13542.2—2021[S]. 2021.
Film for electrical insulation—Part 2: Methods of test:GB/T 13542.2—2021[S]. 2021.
- [6] 徐明忠. 聚丙烯的晶型对电性能的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2006.
- [7] J. POSPIESZNA. Effect of surface treatment on polypropylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(4):46-53.
- [8] 胡跃鑫,韩向艳,雷良才,等. 等规度分布对双向拉伸聚丙烯非等温结晶动力学的影响[J]. 材料导报,2015, 29(11):21-29.
- [9] 胡跃鑫,韩向艳,胡珍珠,等. 聚丙烯等规序列长度分布对BOPP薄膜加工性能的影响[J]. 塑料,2016, 45(1):35-38.
HU Yuexin, HAN Xiangyan, HU Zhenzhu, et al. Effect of isotactic sequence length distribution of polypropylene on processability for biaxially oriented film[J]. Plastics, 2016, 45(1): 35-38.
- [10] 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.
- [11] 姚力丁. 电晕处理对聚丙烯薄膜高速加工性能的影响[J]. 电力电容器,2005(2):46-47.
YAO Liding. The effect of the corona treatment on BOPP film high speed process[J]. Power Capacitor, 2005(2): 46-47.
- [12] 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.
- [13] CHAO Zhang, STEPHEN J. RIGBY, et al. Evaluation of surface alteration of polypropylene[C]//2011 Electrical Insulation Conference, Maryland, 2011.
- [14] 李松伟,等规聚丙烯熔体在拉伸作用下取向结晶研究[D]. 郑州,郑州大学,2012
- [15] 房展清,张玉兰. 聚丙烯力学性能与等规度及形态的关系[J]. 高分子通讯,1982(3):21-26.
- [16] 姚力丁. 提高电容器用BOPP薄膜耐温性能探讨[J]. 电力电容器,2003(2):46-48.
YAO Liding. Discussion on BOPP capacitor film with improved heat resistance[J]. Power Capacitor, 2003(2): 46-48.
- [17] 王文杰,马建,陈鑫. 高温高热对电力电容器的影响及处理措施[J]. 电气技术,2013(2):105-106.
- [18] HIROKI TAKEOKA. Development of polypropylene film capacitor[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Oielectric Materials, 2003.
- [19] 朱新远,田国华,王国明,等. 等规聚丙烯DSC熔融双峰的成因[J]. 高分子材料科学与工程,2001, 17(1):75-78.
ZHU Xinyuan, TIAN Guohua, WANG Guoming, et al. Study on the DSC double endotherms of isotactic polypropylene[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2001, 17(1): 75-78.
- [20] 刘亚丽. PP_MMT纳米复合材料结晶形态与介电性能研究[D]. 哈尔滨,哈尔滨理工大学,2010.
- [21] 侯斌,刘文华,樊祥琳,等. 聚丙烯结晶度测试方法的对比分析[J]. 理化检验:物理分册,2007, 43(9):452-454.
HOU Bin, LIU Wenhua, FAN Xianglin, et al. Comparison and analysis on the measurement methods for crystallinity of propylene[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part a: Physical Testing, 2007, 43(9): 452-454.
- [22] 朱新远. 等规聚丙烯的结晶和熔融行为研究[D]. 上海:上海交通大学,2001.
- [23] S. J. LAIHONEN, U. GAFVERT. DC breakdown strength of polypropylene films area dependence and statistical behavior[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2007, 14(2):101-110.
- [24] CHEN George, ZHAO Junwei, LI Shengtao, et al. Origin of thickness dependent dc electrical breakdown in dielectrics[J]. Applied Physics Letters of Electric Power Systems, 2012, 100: 222904.
- [25] YOU MENG Lu, ZHAOLIN Li. Application research of polypropylene film[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. [S.l.]: IEEE, 2000: 1052-1057.
- [26] 马超,闵道敏,李盛涛,等. 聚丙烯/氧化铝纳米电介质的陷阱与直流击穿特性[J]. 物理学报,2017, 66(6):308-317.
MA Chao, MIN Daomin, LI Shengtao, et al. Trap distribution and direct current breakdown characteristics in polypropylene/Al₂O₃ nanodielectrics[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(6): 308-317.

作者简介:

湛海涯(1985—),女,工程师,通信作者.主要从事电力电容器介质研究工作。Email:zhanhaiya1115@163.com。

信建伟(1983—),男,工程师,从事电力电容器介质研究工作。

王忠辉(1983—),男,助理工程师,从事电力电容器介质研究工作。