

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.01.005

电容器用双向拉伸聚 4-甲基-1-戊烯(BOPMP)薄膜 开发与应用

储松潮, 潘毓娴, 黄云锴, 潘焱尧, 石兆峰, 汪威, 唐兵, 冯玲
(安徽铜峰电子股份有限公司, 安徽 铜陵 244000)

摘要: 聚 4-甲基-1-戊烯(PMP)是一种具有等规结构的新型热塑性塑料, PMP 为结晶性树脂, 熔点在 235 ℃~240 ℃ 之间, 耐热性好, 可在高温下使用, 并具有卓越的电气绝缘和介电性能。与聚丙烯树脂相比, 熔点高 60 ℃, 介电常数、介电损耗相近。随着我国电子工业的发展, PMP 的用量在近年来有大幅的增长。目前世界上只有日本三井化学株式会社生产, 由于产量有限、售价较高, 限制了 PMP 在国内的应用。为此本文尝试采用双向拉伸的方法, 试制聚 4-甲基-1-戊烯(BOPMP)薄膜, 并加工成金属化膜, 试制电容器, 最后对电容器的性能进行相应测试评价。采用不同牌号原料生产 BOPMP 薄膜, 其电压击穿强度差别较大, 不同频率下的 BOPMP 薄膜电容器损耗角正切值、介电常数均与 BOPP 薄膜电容器接近, 但其高温下的性能有待进一步验证。如何提升 BOPMP 薄膜电压击穿强度及其耐热性, 开发出适宜于双向拉伸的 PMP 粒子原料, 生产出高质量的 BOPMP 电容薄膜, 将是未来重点研究的方向。

关键词: 金属化薄膜电容器; 聚 4-甲基 1-戊烯; 双向拉伸; BOPMP

Development and Application Of Biaxial Oriented Poly 4-methyl-1-pentene(BOPMP) Film for Capacitor

CHU Songchao, PAN Yuxian, HUANG Yunkai, PAN Yanyao, SHI Zhaofeng,
WANG Wei, TANG Bin, FENG Ling

(Anhui Tongfeng Electronics Co., Ltd., Anhui Tongling 244000, China)

Abstract: Poly 4-methyl-1-pentene (PMP) is a new thermoplastics with isotactic structure. The PMP is crystalline resin with melting point between 220 ℃ and 240 ℃ and good heat resistance, can be used at high temperature and has excellent electrical insulation and dielectric performance. Compared with polypropylene resin, the melting point is higher 60 ℃, dielectric constant and dielectric loss are similar. With the development of electronic industry in China, the usage amount of PMP has incresed significantly in recent years. At present, the PMP is only produced by Mitsui Chemical Corporation of Japan, of which the application is limited in China due to its limted production and high price. Therefore, the method of biaxial stretching is tried to produce poly methyl pentene (BOPMP) film, process it into metallized film to produce capacitor. Finally, the performance of the capacitor is correspondingly tested and evaluated. The breakdown voltage strength of BOPMP film produced with diffrent types has large difference and the loss angle tanget value and dielectric constant of BOPMP film capacitor are close to those of BOPP film capacitor at different frequencies, but its performance under high temperature needs verification further. The important research direction is how to improve the breakdown voltage and heat resistance of BOPMP film, develop PMP parcile material suitable for biaxial streching and produce high quality BOPMP capacitor film.

Keywords: metallized film capacitor; poly(4-methyl-1-pentene); biaxial stretching; BOPMP

0 引言

聚4-甲基-1-戊烯(poly4-methyl-1-pentene,PMP)是一种具有等规结构的新型热塑性塑料。目前世界上只有日本三井化学株式会社生产,商品名称TPX。由于产量有限、售价较高,限制了PMP在国内的应用^[1],但在医疗器械、电子电器、包装材料、微孔材料、共混改性等方面应用越来越广,用量也在日益扩大^[2-3]。随着我国电子工业的发展,PMP的离型性及耐温性使其成为优异的电子元件封装用模具材料,用量在近年来有大幅的增长^[3]。也具有非常突出的光学性能、机械性能、耐高温性以及电学性能^[2-3]。PMP具有独特的半结晶型规整立体结构,结晶度为40%~60%,且结晶区和无定形区密度几乎相等,PMP有很高的透明性,折射率为1.463,透光率可达90%,PMP的透光率优于PS和PC^[2,4-5]。在热塑性材料中PMP密度最低(0.83 g/cm³左右),PMP的力学性能与均聚PP较为接近^[2-3]。其具有较高的结晶熔点,透明塑料中熔点最高,PMP的熔点约为235~240℃,具有优良的耐温性,PMP的使用温度可以达到150℃以上,且在此温度下可以保持形状稳定,甚至180℃下仍然可以保持一定时间不变形,其耐热性明显优于PP^[2,5]。PMP具有低的介电常数和介电损耗,电气绝缘性优异,PMP分子没有极性基团,在很宽的温度与频率范围内,其介电常数保持稳定,约为2.12,介电损耗角正切0.000 15,用于电子电气中具有优势^[1,2,6]。PMP的热稳定性良好、加工性较好,可以顺利进行成型加工^[7]。可以通过注射成型、挤出及涂布成型、熔融拉伸法,溶剂成膜法等方法进行加工^[8-11]。Johnson, M.B等人利用等规PMP熔体挤出、退火、单轴拉伸可

生产微孔薄膜^[12-13]。Min Z等人研究了离子型PMP聚合物薄膜,发现介电常数达5,击穿场强可达612 MV/m,同时还表现出良好的频率和温度稳定性(高达160℃),储能密度超过了7 J/cm³,是目前最先进的双向取向聚丙烯薄膜的两倍^[14]。Xu,L.等研究不同拉伸比例下PMP铸片的片层结构和拉伸膜的性能^[15]。Gupta,S.等对PMP作为高温储能介质电容器膜进行了评价。溶液浇铸成膜双轴拉伸,强度提高了450%,击穿场强获得了514 V/μm,与BOPP相比,可以在更高温度下工作^[16]。Zhang,N.等研究了PMP的介电和高压性能,并与BOPP在高功率密度和高温电容器应用中的性能进行了比较。PMP的熔化温度比BOPP高60℃左右,同时仍保持较低的介质损耗和与BOPP相当的能量密度和充放电效率,有望取代BOPP在高温脉冲功率和功率调节方面的应用^[17]。

1 试验

1.1 实验材料及装备

本项目的试验材料均由日本三井化学提供,试验牌号为TPX61-2,TPX162-D,未做说明的薄膜样品或试品的原材均采用TPX61-2。试验生产线及相关测试设备均由铜峰电子提供。

1.2 薄膜的制备

双向拉伸聚丙烯薄膜规模化制造设备与工艺技术方法均很成熟,产品质量可靠^[18],PMP材料的工业化的双向拉伸还未见报道。本次试验将尝试采用BOPP或BOPET双向拉伸生产线进行BOPMP薄膜的生产。BOPMP生产工艺流程图见图1,BOPMP薄膜生产过程图见图2,金属化膜电容器样品试制图片见图3。

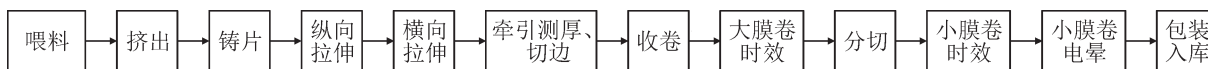


图1 BOPMP生产工艺流程图
Fig. 1 BOPMP production flow chart

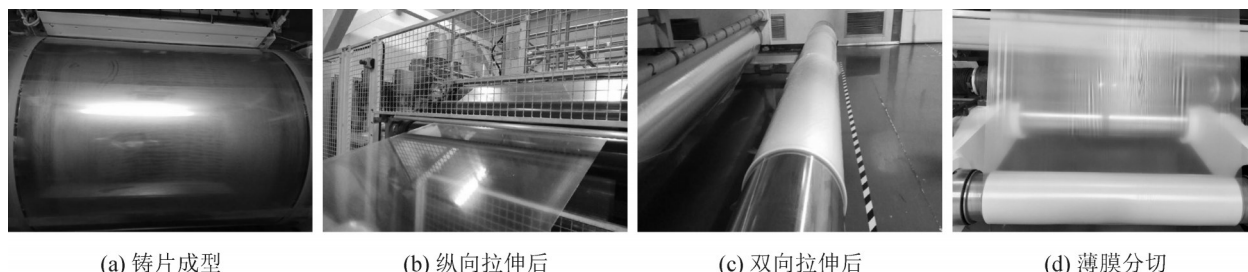


图2 BOPMP薄膜生产过程图片
Fig. 2 Pictures of BOPMP film production

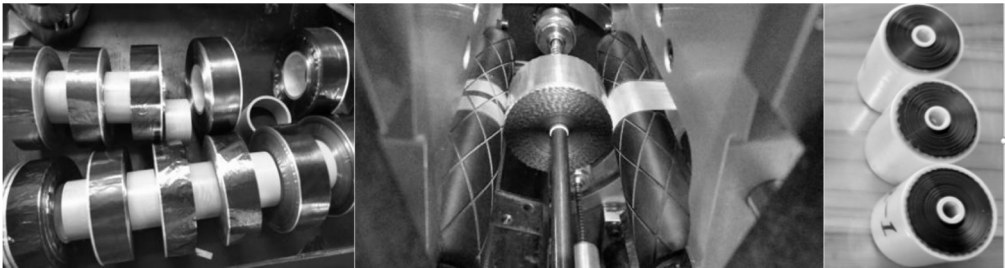


图3 金属化膜电容器样品试制图片
Fig. 3 Pictures of metallizd capacitor sample

1.3 试品的加工生产

将分切好的双向拉伸的 PMP 薄膜,进行离线电晕处理,按电容器用金属化聚丙烯薄膜的镀膜与分切生产工艺进行加工。TPX61-2,规格为 30 mm×1.5 mm,蒸镀方阻:2-3 Ω/□,铝膜;TPX162-D,规格为 40 mm×1.5 mm,蒸镀方阻:2-50 Ω/□,锌铝膜。按金属化电容器工艺进行电容器卷绕、喷金、焊接和引出并用环氧树脂封装制成电容器样品,每一个电容器样品的电容量大概为 2.5 μF。

2 实验结果与讨论

2.1 薄膜的性能指标

按照 GB/T 13542.2 和 GB/T 13542.3 对 BOPMP 薄膜进行相关性能测试^[19-20],见表 1 和表 2。由于初次试制,薄膜厚度较厚。与电容器用 BOPP 比较,拉伸强度、弹性模量、电气绝缘强度较低,特别是电气绝缘强度较其理论值低,可能与材料配方有关,TPX162-D 生产的薄膜样品的耐电压强度则有明显的提高。另外,热收缩率、粗糙度等指标大小与加工工艺有关。

表1 BOPMP薄膜测试数据(TPX61-2)
Table 1 Test data of BOPMP film (TPX61-2)

试验项目		测量值	标准偏差
厚度/μm	千分尺	22.55	2.87
	电子单层	23.15	5.20
	重量法平均值	21.28	—
	重量法极差	7.91	—
拉伸强度/(N/mm ²)	MD纵向	29.68	2.37
	TD横向	91.70	14.05
断裂伸长率/%	MD纵向	223.00	7.95
	TD横向	48.70	6.44
弹性模量/(N/mm ²)	MD纵向	533.00	53.28
	TD横向	840.00	85.49
热收缩率(120℃)/%	MD纵向	2.27	0.14
	TD横向	0.82	0.08
粗糙度 Ra/μm	AK 气刀面	0.19	0.02
	CR 冷辊面	0.22	0.07
雾度/%	—	16.63	1.70
摩擦系数	静态	0.70	0.04
	动态	0.65	0.04
介电强度(DC)/(V/μm)	Eb	321.70	22.94
	最小值	272.65	252.77
相对介电常数	—	2.15	—
体积电阻率/(Ω·m)	—	>10 ¹⁴	—
损耗角正切	—	0.000 2	—
空隙率 S _f /%	—	5.96	—

表2 BOPMP薄膜测试数据(TPX162-D)
Table 2 Test data of BOPMP film (TPX162-D)

试验项目		编号	1122-1035	1122-1118	1122-1520
			162-D	162-D	162-D
厚度/μm	电子单层		18.14	15.74	17.59
拉伸强度/(N/mm ²)	MD纵向		80.16	99.10	95.04
	TD横向		115.81	119.68	101.18
断裂伸长率/%	MD纵向		99.18	79.22	83.51
	TD横向		63.30	66.84	69.76
弹性模量/(N/mm ²)	MD纵向		1 101.82	1 141.68	1 022.63
	TD横向		1 162.70	1 174.27	974.67
热收缩率(120℃)/%	MD纵向		4.33	4.70	5.40
	TD横向		1.17	1.03	0.60
粗糙度 Ra/μm	AK 气刀面		0.16	0.16	0.18
	CR 冷辊面		0.18	0.15	0.17
雾度/%	—		28.63	31.70	37.70
介电强度(DC)/(V/μm)	—		459.98	559.31	451.07

2.2 薄膜表面微观结构分析

BOPMP 薄膜表面进行扫描电镜分析见图 4，其表面微观结构与 BOPP 薄膜表面微观结构明显不同^[21-27]。BOPP 薄膜表面典型微观结构见图 5。

BOPP 薄膜表面形成“火山口”样的结晶环，而 BOPMP 表面在放大倍数较低时，表面结构特征不明显。在放大 1 000 倍时，薄膜表面有明显的细条纹状特征，继续放大时，薄膜表面呈明显的织物状特征。

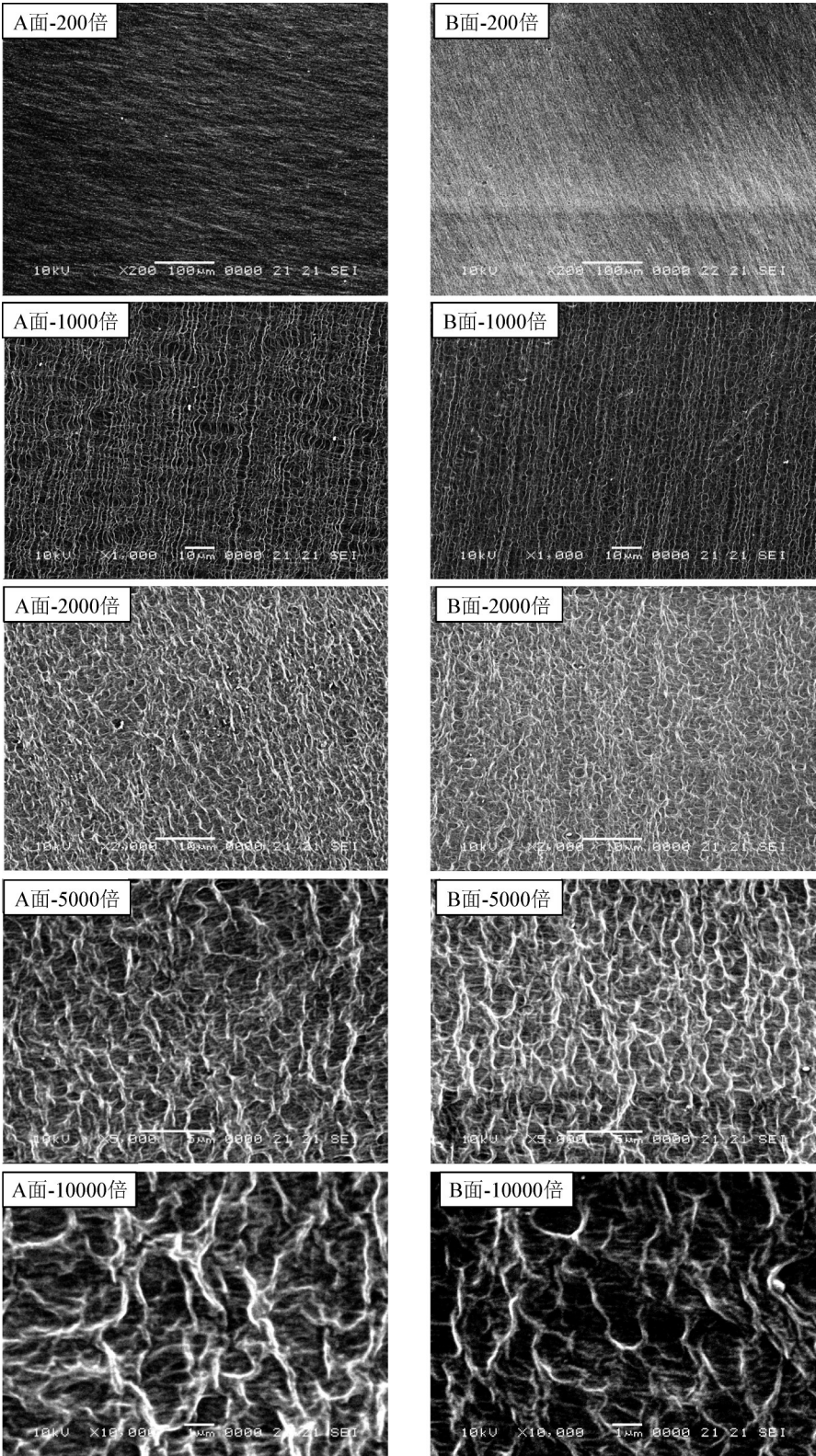


图4 BOPMP(TPX61-2)薄膜双面微观扫描电镜照片
Fig. 4 SEM of BOPMP film(TPX61-2)

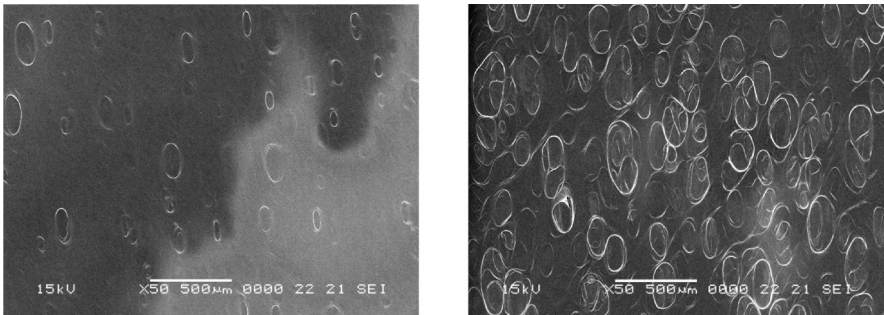


图5 BOPP薄膜表面典型微观结构
Fig. 5 Typical SEM of BOPP film surface

2.3 电容器试品的电容量与损耗角正切值比较

在不同测试频率下 BOPMP 薄膜试制的电容器试品的电容量与损耗角正切值变化与 BOPP 薄膜电容器

的特性表现一致,BOPP 和 BOPMP 电容器成品比较见表 3。BOPMP 薄膜具有良好低介质损耗特性,其介电性能是最接近 BOPP 膜的材料之一。

表3 BOPP和BOPMP电容器试品比较
Table 3 Comparison of BOPP and BOPMP capacitor samples

型号	测试频率									
	100 Hz		1 kHz		10 kHz		20 kHz		100 kHz	
	容量/μF	损耗	容量/μF	损耗	容量/μF	损耗	容量/μF	损耗	容量/μF	损耗
BOPP单面四串	1.974	0.000 1	1.973	0.000 1	1.977	0.000 1	1.987	0.000 1	2.564	0.039 8
BOPP单面四串	1.985	0.000 1	1.984	0.000 1	1.988	0.000 1	2.000	0.000 1	2.633	0.039 9
BOPP双面	1.988	0.000 1	1.987	0.000 1	1.989	0.000 2	1.996	0.000 4	2.427	0.045 1
BOPP双面	1.985	0.000 1	1.984	0.000 1	1.986	0.000 2	1.991	0.000 4	2.347	0.044 6
BOPMP-D15	2.557	0.000 1	2.556	0.000 1	2.561	0.000 3	2.577	0.000 4	3.631	0.061 7
BOPMP-D16	2.566	0.000 1	2.565	0	2.571	0.000 2	2.589	0.000 4	3.862	0.063 0

注:单面4串:单面金属化,双面:双面金属化。

2.4 电容器试品耐电压测试分析

对用 TPX162-D,规格为 40 mm×1.5 mm,蒸镀方阻:2-50 Ω/□,锌铝膜卷制的电容器进行了直流自愈及击穿电压试验。BOPMP 薄膜具有相对良好的自愈性,不同温度下的最终击穿电压均比起始自愈电压高出较多。虽然耐高温性能没有表现出理论上的优越,但薄膜在 150 ℃ 的击穿强度与 120 ℃ 基本持平,保持了一定高温稳定性。不同温度下 TPX162-D 电容器试品测试见图 6。

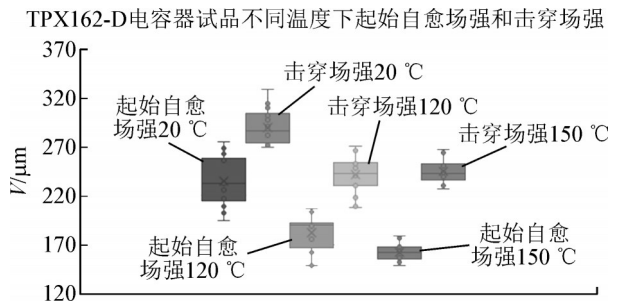


图6 不同温度下TPX162-D电容器试品测试
Fig. 6 Test of TPX162-D capacitor sample at different temperatures

2.5 电容器试品直流耐久性测试及分析

采用耐电压测试分析的同批电容器试品选择

不同的试验电压场强的耐久性测试。70 ℃ 条件下,经过 1 000 h 老化试验后,总共 12 只试品中大部分产品保持了电容量的稳定性。有两只试品初期电容量衰减较大,估计与制造工艺有关,试品自愈导致电容量损失较多,但后期电容量衰减较小。120 ℃ 条件下,前 400 h,电容量衰减比较小,但后期衰减离散性大。虽然测试场强较低,但该薄膜电容器在 120 ℃ 条件下保持了一定的电容量的稳定性。70 ℃、120 ℃ 时 BOPMP 电容器试品耐久性试验见表 4-5 及图 7-8。

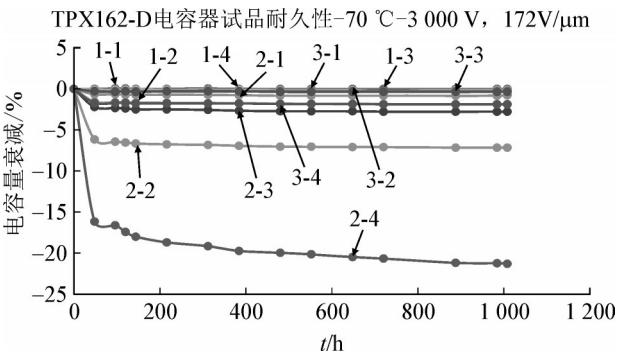


图7 70 ℃ 时BOPMP(TPX162-D)电容器试品
耐久性试验
Fig. 7 Endurance test of BOPMP(TPX162-D) capacitor sample at 70 ℃

表4 70℃时BOPMP(TPX162-D)电容器试品耐久性试验
Table 4 Endurance test of BOPMP(TPX162-D) capacitor samples at 70℃

时间/h	(ΔC/C)/%											
	1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4	3-1	3-2	3-3	3-4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	0	-1.56	-0.18	-0.12	-0.65	-6.14	-2.21	-16.13	-0.24	-0.25	-0.30	-1.7
96	0.06	-1.62	-0.18	-0.12	-0.65	-6.42	-2.32	-16.59	-0.24	-0.25	-0.36	-1.7
120	0.06	-1.62	-0.18	-0.12	-0.71	-6.53	-2.38	-17.40	-0.24	-0.25	-0.30	-1.7
144	0	-1.68	-0.18	-0.12	-0.71	-6.64	-2.49	-17.98	-0.30	-0.25	-0.36	-1.76
216	0	-1.68	-0.18	-0.12	-0.71	-6.75	-2.49	-18.67	-0.24	-0.25	-0.30	-1.76
312	0.06	-1.74	-0.18	-0.12	-0.71	-6.81	-2.55	-19.13	-0.24	-0.19	-0.30	-1.76
384	0	-1.74	-0.18	-0.12	-0.77	-6.92	-2.66	-19.71	-0.30	-0.25	-0.30	-1.76
480	0	-1.80	-0.24	-0.18	-0.83	-7.03	-2.72	-19.94	-0.30	-0.25	-0.36	-1.82
552	0	-1.80	-0.18	-0.18	-0.83	-7.03	-2.72	-20.12	-0.30	-0.25	-0.36	-1.82
648	0	-1.85	-0.18	-0.18	-0.83	-7.08	-2.72	-20.46	-0.30	-0.25	-0.36	-1.82
720	0	-1.85	-0.24	-0.18	-0.83	-7.08	-2.77	-20.64	-0.12	-0.25	-0.36	-1.88
888	0	-1.85	-0.18	-0.18	-0.83	-7.14	-2.77	-21.16	-0.36	-0.25	-0.36	-1.88
984	0	-1.85	-0.18	-0.18	-0.83	-7.14	-2.77	-21.21	-0.30	-0.25	-0.36	-1.88
1008	0	-1.85	-0.18	-0.18	-0.77	-7.14	-2.77	-21.27	-0.36	-0.25	-0.36	-1.88

表5 120℃时BOPMP电容器试品耐久性试验
Table 5 Endurance test of BOPMP capacitor sample at 120℃

时间/h	(ΔC/C)/%											
	1-11	1-12	1-13	1-14	2-11	2-12	2-13	2-14	3-11	3-12	3-13	3-14
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	0	-0.19	-0.32	-0.49	-0.06	-0.18	-0.3	-0.49	-0.07	-0.26	-0.38	-0.65
96	-0.20	-0.26	-0.45	-0.49	-0.12	-0.24	-0.36	-0.49	-0.13	-0.32	-0.45	-0.65
120	-0.26	-0.39	-0.52	-0.55	-0.24	-0.30	-0.36	-0.49	-0.26	-0.32	-0.45	-0.65
144	-0.20	-0.39	-0.52	-0.67	-0.12	-0.24	-0.36	-0.61	-0.07	-0.32	-0.51	-0.78
216	-0.33	-0.58	-0.71	-0.86	-1.03	-0.48	-0.71	-0.79	-0.20	-0.97	-0.76	-0.97
312	-0.40	-0.78	-1.16	-1.65	-1.94	-1.03	-1.78	-1.16	-0.26	-1.88	-1.40	-1.29
384	-0.66	-0.91	-1.29	-1.84	-1.35	-1.94	-3.86	-1.22	-0.59	-2.59	-1.72	-1.36
480	-0.79	-1.36	-2.32	-3.92	-3.17	-6.79	-11.76	-1.52	-0.66	-4.47	-3.12	-1.42
552	-0.66	-1.62	-2.77	-6.61	-4.23	-7.58	-14.26	-2.20	-0.53	-5.44	-4.14	-1.87
648	-0.79	-2.07	-3.48	-12.74	-7.35	-11.64	-18.00	-5.49	-0.66	-6.93	-7.83	-2.65
720	-1.12	-3.04	-5.35	-16.29	-11.58	-16.36	-21.69	-6.4	-0.85	-9.97	-10.25	-2.84
816	-1.32	-3.69	-6.71	-19.53	-15.11	-20.06	-37.67	-6.95	-0.92	-11.59	-11.53	-3.17
888	-1.85	-4.72	-9.55	-25.35	-21.40	-26.00	-46.29	-7.99	-0.99	-14.30	-14.08	-3.62

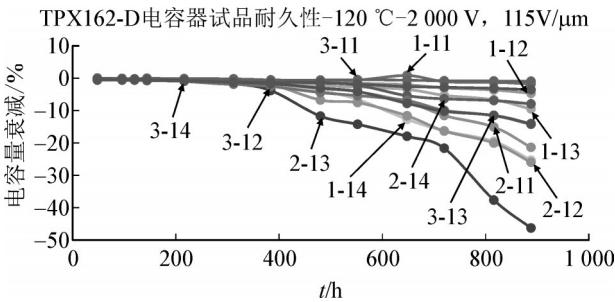


图8 120℃时BOPMP(TPX162-D)电容器试品耐久性试验
Fig. 8 Endurance test of BOPMP(TPX162-D) capacitor sample at 120℃

3 结语

PMP 材料具有优异的介电和电气绝缘性能,其熔点比 PP 高出 60℃ 以上,理论上其耐热性能比 PP 好。采用不同牌号原料生产 BOPMP 薄膜,其电压击穿强度差别较大,不同频率下的 BOPMP 薄膜电容器损耗角正切值、介电常数均与 BOPP 薄膜电容器接近,但其高温下的性能有待进一步验证。同时,受限于试验原料及其配方,以及 PMP 双向拉伸成膜工艺还不成熟,试制的 BOPMP 薄膜样品品质

有待提高。因此,如何提升 BOPMP 电压击穿强度及其耐热性,开发出适宜于双向拉伸的 PMP 粒子原料,生产出高质量的 BOPMP 电容薄膜,将是下一步重点研究的方向,最终在部分耐高温领域实现 BOPMP 薄膜对 BOPP 薄膜的替代应用。

参考文献

- [1] 任鹤,高宇新,吴薇. 聚4-甲基-1-戊烯的研究进展及应用[J]. 现代塑料加工应用,2022,34(1):60-63.
- [2] 赵彤,于泓锦,薛增增,等. 聚4-甲基-1-戊烯的结构与性能[J]. 现代塑料加工应用,2020,32(2):5-8.
- [3] 陶海俊,张军. 聚4-甲基戊烯-1(TPX)的加工和应用[J]. 合成材料老化与应用,2006(2):50-54.
TAO Haijun, ZHANG Jun. The processing methods and applications of poly(4-methyl-1-pentene) (TPX) resin[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2006(2):50-54.
- [4] BUHR, NIEGT, RONGJH, et al. Crystal lization and compatibility of poly(4-methyl-1-pentene) and poly propylene in their blends[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2015, 28(8):1110-1123.
- [5] 张素霖. 展望TPX[J]. 塑料工业, 1984, 15(2):54-56.
- [6] 国江,马跃,林浩,等. 特高压用大容量优比特性电容器内熔丝最小熔断能量试验研究[J]. 高压电器, 2022, 58(2):42-49.
GUO Jiang, MA Yue, LIN Hao, et al. Study on minimum fusing energy test of inner fuse for capacitor with large capacity and superior ratio in UHV application[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2):42-49.
- [7] 赵彤,李丹婷,薛增增,等. 聚4-甲基-1-戊烯树脂的加工流变性与热稳定性[J]. 现代塑料加工应用, 2021, 33(3):22-24.
- [8] 陶海俊,张军,王晓琳. 聚4-甲基-1-戊烯微孔膜的研究进展[J]. 化工进展, 2006, 25(3):275-280.
TAO Haijun, ZHANG Jun, WANG Xiaolin. Research review on the preparation of polymethylpentene membrane[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2006, 25(3):275-280.
- [9] 蒋晓钧,曾一鸣,施艳莽,等. 成膜溶剂对聚4-甲基戊烯-1膜形态结构及渗透汽化特性的影响[J]. 功能高分子学报, 2001, 14(2):133-137.
JIANG Xiaojun, ZENG Yiming, SHI Yanqiao, et al. Effects of membrane-forming solvents on the morphology and pervaporation behavior of PMP membranes[J]. Journal of Functional Polymers, 2001, 14(2):133-137.
- [10] 蔡启. 熔体拉伸TPX微孔膜的制备及性能研究[D]. 广州:广东工业大学, 2015.
- [11] 张世民,程千炬,谷恒勤,等. 聚4-甲基戊烯-1溶液水面展开制备超薄膜的研究[J]. 功能高分子学报, 1989(2):110-114.
- [12] 黄小雷,刘文,刘群华. TPX用于高温型合成革离型纸的研究[J]. 纸和造纸, 2014, 33(1):50-54.
- [13] MATTHEW B. JOHNSON, GARTH L. WILKES. Microporous membranes of isotactic poly(4-methyl-1-pentene) from a melt-extrusion process. I. Effects of resin variables and extrusion conditions[J]. J. Appl. Polym. Sci., 2002, 83(10):2095-2113.
- [14] JOHNSON, M. B. AND WILKES, G. L. Microporous membranes of isotactic poly(4-methyl-1-pentene) from a melt-extrusion process. II. Effects of thermal annealing and stretching on porosity[J]. J. Appl. Polym. Sci., 2002, 83(5):1076-1100.
- [15] MIN Z, LIN Z, MENG Z, et al. Controlled functionalization of poly(4-methyl-1-pentene) films for high energy storage applications[J]. Journal of Materials Chemistry a, 2016, 4(13):4797-4807.
- [16] XU Liyang, WU gaogao, MENG Zhao, et al. Effect of external field on the lamellar crystalline structure and properties of poly(4-methyl-1-pentene) casting film[J]. J. Appl. Polym. Sci., 2019, 136(13):47293.
- [17] GUPTA S., OFFENBACH I., RONZELLO J. Evaluation of poly(4-methyl-1-pentene) as a dielectric capacitor film for high-temperature energy storage applications [J]. J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys., 2017, 55(20):1497-1515.
- [18] ZHANG N, HO, et al. Light weight high temperature polymer film capacitors with dielectric loss lower than polypropylene[J]. Journal of Materials Science - Materials in Electronics, 2015, 26(12):9396-9401.
- [19] 储松潮,常庆阳,吴建章,等. 耐高温BOPP电容薄膜的开发和应用 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(1):62-64.
CHU Songchao, CHANG Qingyang, WU Jianzhang, et al. Development and application of high temperature resistance biaxially oriented polypropylene film for capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(1):62-64.
- [20] 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: Methods of test: GB/T 13542. 2-2009 [S]. 2009.
- [21] 电气绝缘用薄膜 第3部分:电容器用双轴定向聚丙烯薄膜:GB/T 13542. 3-2006[S]. 2006.
Film for electrical insulation- Part 3: Biaxially oriented polypropylene films for capacitors: GB/T 13542. 3-2006[S]. 2006.
- [22] TAMURA S., OHTA K. Study of crater structure formation on the surface of biaxially oriented polypropylene film[J]. J. Appl. Polym. Sci., 2011, 124(4):2725-2735.
- [23] TAMURA S., TAKINO K. Crater formation mechanism on the surface of a biaxially oriented polypropylene film [J]. J.

- Appl. Polym. Sci., 2012, 126(2): 501-512.
- [24] 王佳昕, 李化, 王哲豪, 等. 金属化膜电容器电极边缘电场畸变研究[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 29-36.
- WANG Jiaxin, LI Hua, WANG Zhehao, et al. Research on electric field distortion at the edge of metallized film capacitor electrode[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 29-36.
- [25] 方田, 李化, 黄想, 等. 工频叠加谐波电压下温度对全膜电容器绝缘介质击穿特性的影响[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 142-148.
- FANG Tian, LI Hua, HUANG Xiang, et al. Influence of temperature on the dielectric breakdown characteristics of foil-film capacitor under AC superimposed harmonic voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 142-148.
- [26] 周晨, 张翔, 刘磊, 等. 换流阀阻尼电容器等效温升试验及寿命评估[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 149-155.
- ZHOU Chen, ZHANG Xiang, LIU Lei, et al. Equivalent temperature rise test and life evaluation of converter valve damping capacitor[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 149-155.
- [27] 柴斌, 史磊, 韦鹏, 等. 油浸电容器元件损耗频率特性计算参数的修正[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 211-216.

CHAI Bin, SHI Lei, WEI Peng, et al. Correction on power loss characteristic calculation parameters of oil immersed capacitor elements[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 211-216.

作者简介:

储松潮(1967—), 男, 正高级工程师, 主要从事薄膜及电容器的设计与制造工作。

潘毓娴(1982—), 女, 高级工程师, 主要从事金属化膜和电容器的工艺工作。

黄云锴(1973—), 男, 高级工程师, 主要从事电容器设计、制造、试验等工作。

潘焱尧(1975—), 男, 正高级工程师, 主要从事电容器的设计、制造工作。

石兆峰(1972—), 男, 工程师, 主要从事金属化膜生产制造工作。

汪威(1983—), 男, 工程师, 主要从事电容器的设计工作。

唐兵(1965—), 男, 高级工程师, 主要从事薄膜研究工作。

冯玲(1970—), 女, 工程师, 主要从事薄膜开发工作。