

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.05.029

不同改性聚丙烯电缆绝缘料的结构与性能对比分析

陈鸿¹, 赵健康¹, 黄凯文¹, 赵鹏¹, 欧阳本红¹, 刘首文²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430074;

2. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430077)

摘要:聚丙烯(PP)是一种环保型电缆绝缘料,具有较为良好的绝缘性能,且作为热塑性材料具有可回收等优点。但PP的韧性差,在低温下容易发生脆断,因此需要对其进行增韧改性。文中在PP中分别添加10%质量分数的乙烯-辛烯共聚弹性体(POE)和氢化苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SEBS)弹性体制备共混改性试样,以PP为基体与乙烯(PE)在反应釜内合成共聚改性试样,并测试改性前后PP的结构、理化性能、机械性能和电气性能,发现改性后PP韧性、拉伸强度和断裂伸长率均提高,但熔融温度下降,介质损耗增加。对比2种改性PP可得,共聚改性PP起始熔融温度更高,在20~80℃下的交流击穿场强更高;共混改性PP的机械性能更优异,高温下的介质损耗更低。综合考虑,共聚改性方式可能更适用于对PP的增韧改性。

关键词:聚丙烯(PP);共聚改性;共混改性;电气性能;机械性能;理化性能

中图分类号:TM85

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)05-0233-07

0 引言

交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)虽具有良好的电气性能和机械性能^[1-3],但在生产过程中需要进行交联和脱气处理^[4],生产工艺复杂、生产能耗大、效率低。且XLPE为热固性聚合物,在退役后无法回收利用,目前焚烧和掩埋XLPE的处理方式对环境造成了很大污染^[5-6]。

聚丙烯(polypropylene, PP)作为一种常见的热塑性材料,相比XLPE拥有更高的击穿场强和体积电阻率^[7-8]。PP的熔点超过150℃,比XLPE高约40℃,优良的耐高温性使其在高温下无须进行交联,因此在电缆退役后可以回收利用,符合环境保护理念^[9-11]。PP电缆的生产过程可以通过1条连续的生产线完成三层共挤、内护套、铠装、外护套等生产过程,大大缩短了电缆的供货周期,减少了生产过程中的能量损耗^[12]。然而PP的弹性模量高、韧性差,低温下容易发生脆断^[13-14],难以对其进行加工、生产及敷设,不能直接应用于电缆绝缘中,须对其进行改性。

目前对PP的增韧方法有共混改性和共聚改性^[15-20]。乙烯-辛烯共聚弹性体(polyolefin elastomer, POE)和氢化苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene ethylene butylene styrene, SEBS)是对PP进行共混改性的常用弹性体,与PP共混后均能

显著提高复合体系的韧性。共聚改性是将丙烯单体与其他烯烃在催化剂作用下嵌段,从而得到共聚PP。乙烯(polyethylene, PE)分子链柔顺性比丙烯高,可以与丙烯嵌段对PP进行共聚改性。目前已有的研究都只研究共聚改性PP的性能或只研究共混改性PP的性能。由于这些研究所用的PP原料在等规度、密度等方面均存在差异,因此难以通过对比研究结果来准确得到共聚改性和共混改性的差异。

文中制备了使用相同PP基料的共聚改性PP和共混改性PP,且共聚改性通过石化装置进行,相较于目前常见的实验室制备方法,所得材料具有更好的均一性和稳定性。以等规聚丙烯(isotactic polypropylene, iPP)、共聚改性PP和共混改性PP为研究对象,对试样进行红外光谱分析、扫描电子显微镜观察、差示扫描量热分析、机械性能测试、介电常数和介质损耗测试、交流击穿场强测试,研究了电缆绝缘料PP在共聚改性和共混改性后的性能变化,并对比了PP在2种改性方法下的性能差异。

1 试样制备及测试方法

1.1 试样制备

文中采用典型的PP基料和不同改性的PP试样,其中基料iPP的等规度为96%,熔体流动速率为0.32 g/min,密度为0.905 g/cm³,抗拉强度为38.1 MPa。

共聚改性PP的制备采用Innovene气相聚合工艺技术,将iPP与PE共聚后得到共聚改性PP。其

收稿日期:2022-02-12;修回日期:2022-04-25

基金项目:国家电网有限公司科技项目“大容量环保型电缆绝缘料理化特性评价及中压聚丙烯电缆试验方法研究”

中,在第一反应釜中形成 iPP,在第二反应釜中将 PE 与 iPP 进行聚合。

共混改性 PP 的制备方式为:将原材料放入 80 ℃ 的烘箱中干燥 24 h 去除水分。将助剂和共混比例为 9:1 的树脂颗粒依次放入高速混合机搅拌 30 min 以使共混物分散均匀。从机筒的温度为 170 ℃,单螺杆挤出机的温度为 175 ℃,动态混合器的温度为 180 ℃,熔体泵和机头的温度均为 180 ℃。

文中使用的试样及代号有:燕山石化公司生产的 iPP、iPP 与 PE 嵌段共聚得到的共聚改性 PP (PP1)、iPP 添加 10% 质量分数的 POE 共混得到的共混改性 PP (PPa)、iPP 添加 10% 质量分数的 SEBS 共混得到的共混改性 PP (PPb)。

1.2 测试方法

1.2.1 微观结构分析

(1) 分子结构分析。使用澳大利亚 Lambda Scientific 公司生产的 FTIR-7600 傅里叶红外光谱仪分析 PP 的分子结构。先采集空气作为背景,再采集约 300 μm 厚的薄膜试样,记录试样的红外光谱图并进行对照分析。测试范围为 3 500 ~ 500 cm⁻¹。观察构成试样的主要化学键和相应官能团相对含量的变化。

(2) 晶体形态观察。使用 Olympus 公司生产的 bx51-P 偏光显微镜观察晶体形态。将试样以 10 ℃/min 升温至 220 ℃,保温 5 min 后以 2 ℃/min 降温至 80 ℃。在降温过程中以 1 张/s 的拍照速度对试样进行记录。

(3) 韧性分析。采用日本 KEYENCE VE-9800 扫描电子显微镜观察 PP 增韧情况。测试前先将试样放进装有液氮的容器中,冷却 30 s 后取出迅速脆断,置于 60 ℃ 的水浴箱中超声处理 15 min,取出晾干后对断面进行喷金处理,使用扫描电子显微镜观察试样断面形貌。

1.2.2 热分析

使用美国 TA 公司生产的 Q2000 型差示扫描量热仪分析 PP 的熔融和结晶过程。实验在流量为 50 ml/min 的氮气环境中进行,试样称量约 5 mg,以 20 ℃/min 的速率升温至 180 ℃,保温 5 min 后降温至 40 ℃,再升温至 180 ℃。为消除热历史影响,熔融过程取第二次升温熔融曲线。

1.2.3 机械性能测试

文中使用的拉伸试验设备为美特斯 CMT-4503 型电子万能拉伸试验机。测试方法参照 GB/T 1040—92,拉伸速率为 25 mm/min,5 个样条为 1 组,每种试样至少保证有 5 次有效的断裂,测试环境

温度为室温 25 ℃。

1.2.4 电气性能测试

(1) 介质损耗测试。采用 Concept 80 型宽带介电谱仪测试 PP 的介质损耗。试验电场为 2 kV/mm,试验频率为 50 Hz,温度范围为 20~90 ℃,温度间隔为 10 ℃。

(2) 交流击穿场强测试。采用 HJC-100 kV 型计算机控制电压击穿试验仪进行交流击穿试验。升压速率为 2 kV/s,试样厚度约为 0.5 mm,试验温度为 20 ℃、40 ℃、60 ℃、90 ℃ 和 110 ℃,每组试样进行 10 次击穿试验。

2 测试结果与分析

2.1 微观结构分析结果

2.1.1 分子结构

试样的红外光谱测试结果如图 1 所示。

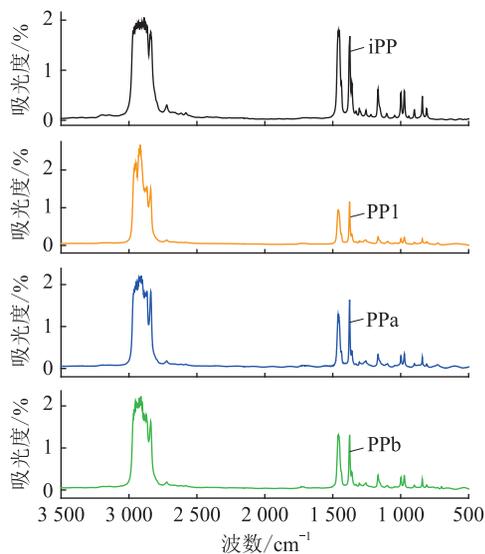


图 1 红外光谱图

Fig.1 FTIR spectrum

有序性指的是分子排列结构的规整性,由于高分子链的构象影响其结晶能力,因而有序度的差异将导致不同的结晶行为,并影响其宏观性能。以不对称变形甲基振动 1 460 cm⁻¹ 谱带为参比峰,分别取 1 167 cm⁻¹、998 cm⁻¹ 和 841 cm⁻¹ 谱带强度,将其与 1 460 cm⁻¹ 谱带强度的比值作为表征 PP 螺旋结构的有序性参数^[21],比值计算结果见表 1,其中 A 为谱带强度。

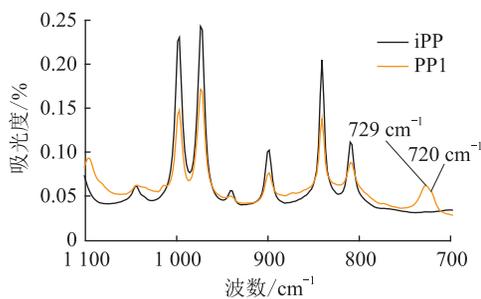
从表 1 可以看出,共聚改性 PP 和共混改性 PP 在各个有规谱带的强度比值均小于 iPP,且共聚改性 PP 的有序度低于共混改性 PP,说明 PP 的共聚改性对降低分子有序性的影响大于共混改性。其中,共聚改性引入的 PE 分子链片段和共混改性添

表 1 比值计算结果

试样	A_{1167}/A_{1460}	A_{998}/A_{1460}	A_{841}/A_{1460}
iPP	0.352	0.316	0.278
PP1	0.256	0.215	0.200
PPa	0.264	0.235	0.214
PPb	0.265	0.232	0.197

加的橡胶体均会造成较多无规则排列的序列结构,使分子链的螺旋型等规结构减少,分子链有序度降低。而共混改性造成有序性降低的原因是共混橡胶相会以微米尺度分散存在于 PP 基体中,分散的橡胶相会抑制 PP 分子链的有序排列。

以 1460 cm^{-1} 谱带为参比峰,将 iPP 和 PP1 的红外光图谱进行缩小(放大)处理,其在 $1100\sim 700\text{ cm}^{-1}$ 波数段的红外光图谱如图 2 所示。从图中可以看出 PP1 在 720 cm^{-1} 和 729 cm^{-1} 时出现很明显的 PE 特征峰,表明在共聚改性 PP 中存在一些由共聚改性引入的相对较长的 PE 链段,这些链段在材料内部的晶区与非晶区中均存在。也就是说,在共聚改性引入的 PE 分子链插入到 PP 分子链上时,PP 分子链并不会因为结构规整性被破坏而完全丧失结晶能力,这些结构并不完美的分子链仍然可以形成结晶,甚至将插入的 PE 链段也卷入结晶中,形成有缺陷的结晶结构。

图 2 $1100\sim 700\text{ cm}^{-1}$ 波数段的红外光图谱Fig.2 FTIR spectrum of $1100\sim 700\text{ cm}^{-1}$

2.1.2 晶体形态

试样在发生完全结晶后,偏光显微镜观察到的结果如图 3 所示。

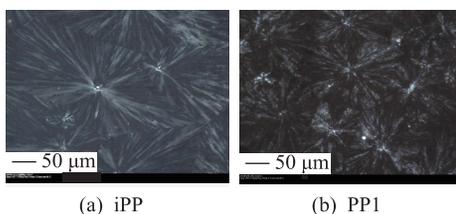


图 3 试样的结晶偏光图

Fig.3 Optical micrographs of specimen

从图 3(a)可以看出,iPP 的晶体间具有较为明

显的边界,晶体直径约为 $200\text{ }\mu\text{m}$;而图 3(b)中 PP1 的晶体间边界不明显,晶体排列密集且直径较小,直径约 $100\text{ }\mu\text{m}$ 。结果表明,iPP 在共聚改性后晶体尺寸减小,排列更加密集。

2.1.3 韧性

图 4 为试样断面在扫描电镜下的形貌。

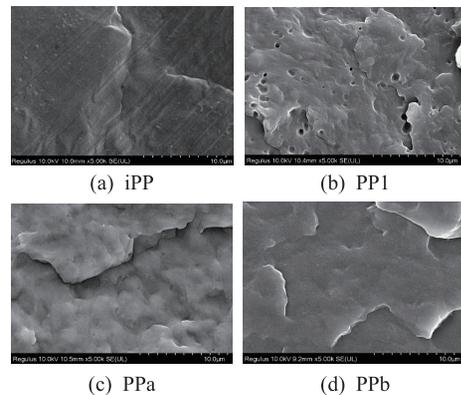


图 4 试样断面的扫描电镜图

Fig.4 SEM view of specimen section

从图 4 可以看出,iPP 的断面处光滑,具有脆性断裂特征,表明 PP 脆性大、韧性差,这也是需要对 PP 进行改性的原因。共聚改性 PP 和 2 种共混改性 PP 的断面更为粗糙,具有韧性断裂的特征。

共聚改性属于化学改性,共混改性为物理改性,2 种改性方式对提高 PP 韧性的机理不同。从晶体形态实验和红外光谱分析结果可以看出,共聚改性改变了材料的结晶形态,使 iPP 球晶的尺寸减小,甚至部分球晶结构被破坏;而共混改性 PP 的增韧机理类似于橡胶增韧机理,符合“银纹-剪切带”理论。当材料受到外力冲击时,弹性体粒子能使外加的冲击应力在其球面上均匀分散,从而减小作用在 PP 基体上的应力。

2.2 热分析结果

差示扫描量热试验中测试试样的熔融曲线如图 5 所示。

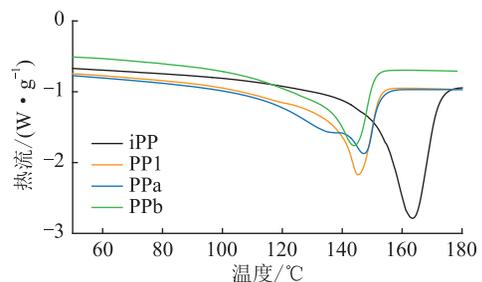


图 5 试样的熔融曲线

Fig.5 The melting curves of the specimens

从图 5 可以看出,在熔融和结晶过程中 PPa 均出现肩峰,这可能是由 POE 较低的熔融温度导致。

由升温曲线得到试样的熔融热焓 ΔH , 通过式(1)计算试样的结晶度 X_c 。

$$X_c = \frac{\Delta H}{\Delta H_{100\%}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\Delta H_{100\%}$ 为试样在热平衡状态下 100% 结晶的熔融焓值, 对于 PP, 取 207.1 J/g。

试样的熔融与结晶参数见表 2。

表 2 熔融与结晶参数

Table 2 Melting and crystallization parameters

试样	熔融峰值温度/°C	结晶峰值温度/°C	结晶度/%
iPP	163	110	46.51
PP1	146	103	28.39
PPa	147	113	29.84
PPb	144	104	29.11

从试验结果中可以看出, 共聚改性和共混改性均降低了 PP 的结晶度。造成共聚改性后结晶度降低的原因, 一方面是在结晶过程中存在部分 PE 嵌段后的 PP 不参与结晶, 另一方面共聚改性后 PP 链段的运动受到 PE 链段的限制, PP 结晶困难, 增加了结晶过程中晶体的不完整性, 导致结晶度降低。而造成共混改性后结晶度降低的原因, 一方面共混弹性体本身的非结晶性能, 另一方面弹性体的存在阻止了 PP 大分子链的运动, 使得 PP 的结晶变得困难, 从而降低了结晶度。

PP 在共聚改性和共混改性后熔融峰值温度均降低, 这是由于 PP 在与 PE 嵌段共聚后分子的柔性增加, PP 有序性降低, 分子链更容易发生运动, 并且在结晶过程中 PE 链段增加了 PP 晶体的不完整性, 使得熔点降低。而共混橡胶相的加入会使 PP 结构变得松散且晶体结构不完整, 导致熔点降低。

对比 PP 共聚改性和共混改性, 熔融峰值温度: PPb<PP1<PPa, PPa 虽然峰值熔融温度较高, 但由于双峰的存在, 当温度高于 112 °C 后开始发生大幅度熔融, 而 PP1 在 125 °C 时仍尚未发生大幅度熔融; 结晶度: PP1<PPb<PPa, PP1 的结晶度低于 2 种共混改性 PP, 因此结晶度会影响 2 种改性 PP 的性能。

2.3 机械性能测试结果

试样在常温下的拉伸性能测试结果如图 6 所示, 机械性能参数见表 3。

由测试结果可知, PP 在共聚改性和共混改性后屈服应力下降, 拉伸强度和断裂伸长率提高。PP1 的拉伸强度和断裂伸长率分别提高了 31% 和 88%; PPa 的拉伸强度和断裂伸长率分别提高了 65% 和 110%; PPb 的拉伸强度和断裂伸长率分别提高了

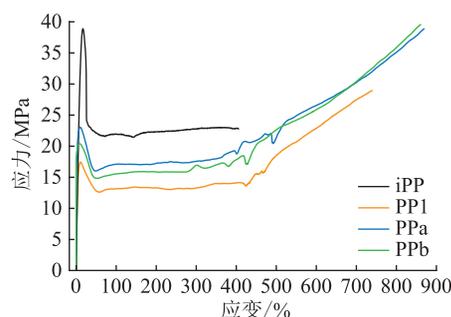


图 6 应力应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves

表 3 机械性能参数

Table 3 Mechanical performance parameters

试样	屈服应力/MPa	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%
iPP	38.87	22.78	405.53
PP1	17.11	29.91	761.73
PPa	23.06	37.53	852.03
PPb	20.82	38.53	858.66

69% 和 112%。共混改性 PP 的提高幅度大于共聚改性 PP。

对于共聚改性后机械性能变化的机制, 共聚 PP 存在一些未形成结晶的 PE 链段, 而 PE 分子链相较于 PP 分子链具有更高的柔性, 因此在受到外力作用时, 这些非晶态的柔性的 PE 分子链能及时地顺着外力作用方向进行松弛, 避免材料内部因过早出现应力集中点而产生更大的破坏。

对于共混改性后机械性能变化, 可以用“银纹-剪切带”理论来解释。在共混体系中 PP 为连续相结构, 而弹性体形成分散相结构。在外力作用下橡胶粒子作为应力集中中心, 在与“银纹”相遇时能够使其转向和支化, 限制“银纹”和“剪切带”的发展。同时弹性颗粒所在区域会产生较大的剪切应变来消耗拉伸过程中带来的能量, 因此共混改性后 PP 的断裂伸长率增加。

对比共聚改性 PP 和共混改性 PP, 屈服应力: PP1<PPb<PPa, 造成 PP1 屈服应力更低的原因之一是其较低的结晶度; 拉伸强度和断裂伸长率: PP1<PPa<PPb, 说明添加 10% 质量分数 POE 或 SEBS 的共混改性 PP 比与 PE 嵌段共聚的共聚改性 PP 拥有更为优异的机械性能。

2.4 电气性能测试结果

2.4.1 介质损耗

介质损耗角正切值 $\tan \delta$ 的测试结果见图 7。

由测试结果可知, PP 的介质损耗随温度的升高而增大, 且改性后介质损耗增大。这是由于在较高温度下偶极子运动速率随着温度的升高加快, 更容

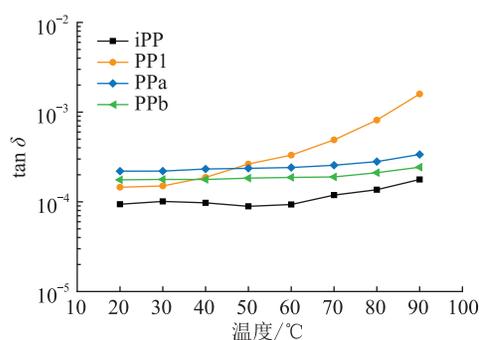


图7 介质损耗

Fig.7 Dielectric loss

易发生转向,导致介质损耗增大。PP在共聚改性后,由于生产过程中的杂质、催化剂以及水分等的残留使得极性基团增多,增大了分子的偶极矩,导致PP的介质损耗增大。PP在共混改性后,弹性体的苯环、丁烯侧基的引入增加了复合材料的电导损耗和松弛极化引起的损耗,因此介质损耗增大。PP1的介质损耗在常温下小于PPa、PPb,虽然其介质损耗随温度变化幅度较大,在90℃温度下高于PPa、PPb,但仍满足国标对电缆绝缘在90℃下介质损耗的要求。

2.4.2 交流击穿场强

表4为试样在不同温度下的交流击穿场强Weibull分布的形状和尺度参数^[22],击穿场强随温度的变化曲线如图8所示。

表4 交流击穿场强Weibull分布参数

Table 4 Weibull distribution parameters of AC breakdown field strength

温度/ ℃	形状参数				尺度参数			
	iPP	PP1	PPa	PPb	iPP	PP1	PPa	PPb
20	30.15	20.94	12.32	31.76	81.27	82.98	79.85	77.84
50	21.69	19.90	43.25	42.22	77.60	79.58	76.27	75.26
80	23.25	29.31	31.73	44.47	71.61	72.28	69.32	69.22
110	30.44	45.12	34.21	29.39	64.68	58.39	61.43	59.04

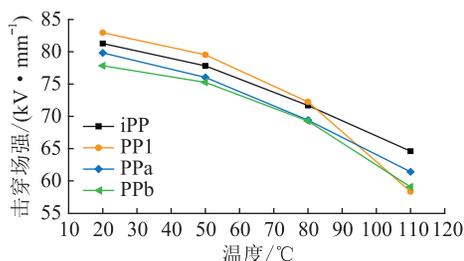


图8 击穿场强随温度变化曲线

Fig.8 The breakdown field strength curves with temperature

由测试结果可知,PP在共聚改性后交流击穿场强增大,共混改性后交流击穿场强减小。共聚改性

后击穿场强增大可能和共聚引入的PE链段在PP结晶中形成的缺陷结构相关,结构缺陷一直以来被认为是材料中陷阱的来源,而陷阱对载流子输运过程的调制被认为是影响击穿性能的重要因素^[23-25]。共混改性后击穿场强降低可能是由于POE和SEBS弹性体的耐电强度较低,与PP共混后降低了PP的击穿场强。

在常温下PP1比PPa、PPb拥有更高的交流击穿场强,但随着温度升高,PP1的击穿场强下降速率较快。在20~80℃范围内,PP1的交流击穿场强仍高于PPa、PPb;当温度为110℃时,PP1的击穿场强低于PPa、PPb。可见在20~110℃的大部分温度范围内,PP1的击穿场强高于PPa、PPb,与PE嵌段共聚的共聚改性PP比添加10%质量分数POE或SEBS的共混改性PP拥有更为优异的交流击穿性能。

3 结论

文中对比了iPP、共聚改性PP和共混改性PP的性能,对于文中所制备的改性PP,有以下结论:

(1) 与PE嵌段共聚的共聚改性、添加10%质量分数POE或SEBS的共混改性均能够大大提高PP的韧性、拉伸强度和断裂伸长率,可以作为PP的增韧改性方法。改性后结晶度、峰值熔融温度降低,介质损耗增大。

(2) PP的共混和共聚2种改性方式各有优势。共混改性后的机械性能提高幅度大于共聚改性,但共混改性后交流击穿场强降低,而共聚改性后交流击穿场强提高。因此PP在共混改性后的机械性能更为优异,共聚改性后的耐交流击穿性能更为优异。

(3) 文中所研究的共聚改性PP和共混改性PP在总体性能方面差异较小,但在电缆生产制造方面,共混改性PP难以控制电缆绝缘挤出的均匀性,因此在对PP电缆绝缘料的改性中共聚改性方式可能更有优势。

参考文献:

- [1] 李欢,李建英,马永翔,等.不同温度热老化对XLPE电缆绝缘材料晶体结构的影响研究[J].中国电机工程学报,2017,37(22):6740-6748,6787.
LI Huan, LI Jianying, MA Yongxiang, et al. Effects of thermal aging on the crystal structures of the XLPE cable insulating material at different temperatures[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6740-6748, 6787.
- [2] 鲁宁.高压XLPE电缆击穿的制造因素分析及有效控制[J].电力工程技术,2017,36(4):43-47,58.
LU Ning. Manufacture factor analysis and effective control of high voltage XLPE cable breakdown[J]. Electric Power Engi-

- neering Technology, 2017, 36(4):43-47, 58.
- [3] 杨亮,周恺,倪周,等. 考虑负荷特性的 XLPE 电缆绝缘老化程度研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(10):113-119.
YANG Liang, ZHOU Kai, NI Zhou, et al. Analysis of XLPE cable insulation aging considering load characteristics [J]. Smart Power, 2020, 48(10):113-119.
- [4] 李欢,徐磊,刘涛,等. 直流 XLPE 电缆绝缘中空间电荷的抑制方法综述[J]. 电力工程技术, 2021, 40(5):54-62.
LI Huan, XU Lei, LIU Tao, et al. Summarization of space charge suppression methods in DC XLPE cable insulation [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5):54-62.
- [5] 何金良,彭琳,周焱. 环保型高压直流电缆绝缘材料研究进展[J]. 高电压技术, 2017, 43(2):337-343.
HE Jinliang, PENG Lin, ZHOU Yao. Research progress of environment-friendly HVDC power cable insulation materials [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2):337-343.
- [6] 朱乐为,杜伯学. 环境友好型直流电缆料聚丙烯绝缘的电树枝研究进展[J]. 电气工程学报, 2018, 13(11):21-29.
ZHU Lewei, DU Boxue. Research status on electrical tree of polymer insulation materials in HVDC cables [J]. Journal of Electrical Engineering, 2018, 13(11):21-29.
- [7] 黄兴溢,张军,江平开. 热塑性电力电缆绝缘材料:历史与发展[J]. 高电压技术, 2018, 44(5):1377-1398.
HUANG Xingyi, ZHANG Jun, JIANG Pingkai. Thermoplastic insulation materials for power cables: history and progress [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5):1377-1398.
- [8] 付红星,安鹤. 国内外聚丙烯薄膜的研究及应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(6):48-53.
FU Hongxing, AN Ge. Research and application of polypropylene film at home and abroad [J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2017, 38(6):48-53.
- [9] 杜伯学,侯兆豪,徐航,等. 高压直流电缆绝缘用聚丙烯及其纳米复合材料的研究进展[J]. 高电压技术, 2017, 43(9):2769-2780.
DU Boxue, HOU Zhaohao, XU Hang, et al. Research achievements in polypropylene and polypropylene/inorganic nanocomposites for HVDC cable insulation [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9):2769-2780.
- [10] ZHU L W, DU B X, LI Z L, et al. Electrical tree characteristics in polypropylene under impulse superimposed DC voltage in LN₂ [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2):7701403.
- [11] YAN Z M, YANG K, ZHANG Y Y, et al. Crosslinking dependence of trap distribution and breakdown performance of cross-linked polyethylene [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2019, 30(23):20605-20613.
- [12] 戚远慧. 聚丙烯基复合介电材料的制备及性能研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2016.
QI Yuanhui. Preparation and properties of polypropylene-based dielectric composite [D]. Guiyang: Guizhou University, 2016.
- [13] 徐航,杜伯学,李进,等. 聚丙烯/弹性体复合材料机械与空间电荷特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(10):3214-3220.
XU Hang, DU Boxue, LI Jin, et al. Mechanical and space charge properties of polypropylene/elastomer blends [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10):3214-3220.
- [14] 王帆,刘小燕,周玲,等. 抗冲共聚聚丙烯的结构与性能[J]. 合成树脂及塑料, 2019, 36(1):58-62, 68.
WANG Fan, LIU Xiaoyan, ZHOU Ling, et al. Structure and properties of IPC [J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2019, 36(1):58-62, 68.
- [15] ISO. Packaging for terminally sterilized medical devices-part 2: validation requirements for forming, sealing and assembly processes:ISO 11607-2[S]. International Organization for Standardization, 2019.
- [16] TAKALA M, RANTA H, NEVALAINEN P, et al. Dielectric properties and partial discharge endurance of polypropylene-silica nanocomposite [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(4):1259-1267.
- [17] 赵洪,栗松,郑昌佶,等. 聚丙烯/聚烯烃弹性体复合材料物理机械性能及交流电性能[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(3):28-37.
ZHAO Hong, LI Song, ZHENG Changji, et al. AC performance and physical/mechanical properties of polypropylene/polyolefin elastomers blends [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(3):28-37.
- [18] 李征,李化,林福昌,等. 聚丙烯纳米复合材料的介电特性研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4):1-6.
LI Zheng, LI Hua, LIN Fuchang, et al. Study on dielectric properties of polypropylene nanocomposite [J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4):1-6.
- [19] ZHA J W, YAN H D, LI W K, et al. Environmentally friendly polypropylene/thermoplastic elastomer composites with modified graphene oxide for HVDC application [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(3):1088-1094.
- [20] ISO. Packaging for terminally sterilized medical devices-part 1: requirements for materials, sterile barrier systems and packaging systems:ISO 11607-1[S]. International Organization for Standardization, 2019.
- [21] 张伟,徐曼,陈光辉,等. 等规和嵌段聚丙烯的结构和性能[J]. 高电压技术, 2017, 43(11):3634-3644.
ZHANG Wei, XU Man, CHEN George, et al. Structure and properties of isotactic polypropylene and ethylene-propylene copolymer [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11):3634-3644.
- [22] 杨佳明,赵洪,郑昌佶,等. 纳米粒子分散性对 SiO₂/LDPE 纳米复合介质直流介电性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19):5087-5094.
YANG Jiaming, ZHAO Hong, ZHENG Changji, et al. Effects of nanoparticles dispersion on the DC dielectric properties of SiO₂/LDPE nanocomposite [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19):5087-5094.
- [23] HOSEINI A H A, ARJMAND M, SUNDARARAJ U, et al. Significance of interfacial interaction and agglomerates on electri-

cal properties of polymer-carbon nanotube nanocomposites[J].
Materials & Design,2017,125:126-134.

- [24] LI Z L,ZHONG Z Y,DU B X. Dielectric relaxation and trap-modulated DC breakdown of polypropylene blend insulation [J]. Polymer,2019,185:121935.
- [25] ALHABILL F N,AYOUB R,ANDRITSCH T,et al. Introducing particle interphase model for describing the electrical behaviour of nanodielectrics [J]. Materials & Design, 2018, 158; 62-73.

作者简介:



陈鸿

陈鸿(1995),男,硕士在读,研究方向为电缆绝缘材料(E-mail:383053389@qq.com);

赵健康(1963),男,博士,研究员级高级工程师,从事电力电缆运行技术相关工作;

黄凯文(1994),男,硕士,助理工程师,从事电缆绝缘材料相关工作。

Comparative analysis of astructure and properties of different modified polypropylene cable insulation materials

CHEN Hong¹, ZHAO Jiankang¹, HUANG Kaiwen¹, ZHAO Peng¹, OUYANG Benhong¹, LIU Shouwen²

(1. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;

2. State Grid Hubei Electric Power Co.,Ltd., Wuhan 430077, China)

Abstract: Polypropylene (PP) is an environmentally friendly cable insulation material with relatively great insulation properties and has the advantages of being recyclable as a thermoplastic material. PP is easy to brittle fracture due to its poor toughness at low temperatures. Hence, it is necessary to improve the toughness of PP. In this paper, three modified PP samples are studied, namely PP blended with 10% mass fraction of polyolefin elastomer (POE), PP blended with 10% mass fraction of styrene ethylene butylene styrene (SEBS), and copolymerization modified PP specimen synthesized with PP as matrix and polyethylene (PE) in the reactor. The PP samples before and after modification are tested to obtain their physical properties, chemical properties, mechanical properties and electrical properties. It is concluded that the toughness, tensile strength and elongation at break of PP increase after the modification, while the melting temperature decreases and the dielectric loss increases. For the modification methods, the initial melting temperature and AC breakdown field strength at 20-80 °C of the copolymerization modified PP specimen are higher than those of the blending modified PP specimens. Instead, the blending modified PP specimens have better mechanical properties and lower dielectric loss at high temperature than the copolymerization modified PP specimen does. After comprehensive consideration, the copolymerization modification may be more suitable to enhance the toughness of PP than the blending modification.

Keywords: polypropylene (PP); copolymerization modification; blending modification; electrical properties; mechanical properties; physical and chemical properties

(编辑 陆海霞)