

35 kV 改性聚丙烯材料性能测试分析

周亚玲*

(无锡工艺职业技术学院, 宜兴 214200)

摘要: 目的 系统评估35 kV改性聚丙烯材料在电线电缆领域的应用潜力。方法 通过采用差示扫描量热法(DSC)、拉伸测试和电气性能评估等实验方法,深入探讨了该材料的机械性能、热性能以及电气绝缘特性。结果 改性聚丙烯显示出优良的机械强度和热稳定性,同时在电气绝缘方面的表现也符合工业应用的高标准。结论 本研究系统化的测试,不仅为聚丙烯材料的进一步改性和优化提供了科学依据,为其未来的市场推广奠定了坚实的基础,也为推动电线电缆材料技术进步和实现环境友好型材料的开发提供了重要的理论与实践价值。

关键词: 35 kV; 改性聚丙烯材料; 性能测试

35 kV modified polypropylene material performance test analysis

ZHOU Ya-Ling*

(Wuxi Vocational and Technical College of Technology, Yixing 214200, China)

ABSTRACT: Objective To systematically evaluate the application potential of 35 kV modified polypropylene in the field of wire and cable. **Methods** The mechanical properties, thermal properties and electrical insulation properties of the material were investigated by differential scanning calorimetry (DSC), tensile test and electrical property evaluation. **Results** The modified polypropylene showed excellent mechanical strength and thermal stability, and the performance of electrical insulation also met the high standards of industrial applications. **Conclusion** The systematic test of this study not only provides a scientific basis for further modification and optimization of polypropylene materials, but also lays a solid foundation for its future market promotion, and provides important theoretical and practical value for promoting the technological progress of wire and cable materials and realizing the development of environmentally friendly materials.

KEY WORDS: 35 kV; modified polypropylene material; performance test

0 引言

聚丙烯作为一种轻质、耐化学腐蚀且热稳定性优良的高分子材料,在高压电气绝缘中广泛应用,也因其优良的物理、化学和机械特性,被广泛应用于包装、汽车、纺织、电气及医疗等行业。聚丙烯的主要特性包括:(1)机械强度高,聚丙烯具有良好的抗拉强度和弹性,能够承受较大的负荷而不变形^[1]。(2)化学稳定性,它对水、酸、碱和多数溶剂具有很好的抵抗能力,不易被腐蚀。(3)绝缘性能,聚丙烯具有优良的电绝缘性能,常用于电气和电子设备的部件^[2]。(4)耐热性,它可以承受连续使用的较高温度,通常在80~100°C范围内,适用于各种热环境下的应用。(5)轻质,聚丙烯的密度小,是塑料家族中较轻的材料之一^[3]。本研究旨在探讨35 kV改性聚丙烯材料的性能表现,以及在电力系统中,将其作为高压电缆绝缘层的应用潜力。通过对35 kV改性聚丙烯材料机械性能、热性能和电气性能的系统测试和分析,评估其在实际应用中的综合性能,如在极端环境下的表现。改性聚丙烯材料的优越性能能够为高压电缆的安全和稳定运行提供强有力的材料保障,同时对于推动材料科学和电力工程的发展具有重要的理论和实践价值。

1 材料与方法

1.1 材料

本次使用的35 kV改性聚丙烯材料由江苏德威新材料股份有限公司提供。为满足高压电气绝缘的特殊要求,选用了POP(聚烯烃弹性体)共混PP(聚丙烯)材料作为试验样本。POP共混PP材料是通过将聚烯烃弹性体(如乙烯-辛烯共聚物)与聚丙烯基体共混制得的一种改性材料,它结合了聚丙烯的高机械强度和POP的优异韧性,显著改善了材料的冲击性能和低温性能。同时,POP的引入有助于提高材料的结晶度和电气绝缘性能,满足35 kV高压电缆绝缘层对材料的严格要求。

1.2 仪器设备

在对聚丙烯材料进行综合性能测试中,使用了多种先进仪器设备。差示扫描量热仪(DSC, Q2000, TA Instruments)用于测定材料的热性能,如玻璃化转变温度、熔融温度及热分解温度,确保高精度的温度控制和热流检测。热重分析仪(TGA, TGA 5500, PerkinElmer)评估材料在高温下的质量变化,提供热稳定性数据。万能材料测试机(Instron 5969型)测定拉伸强度、弯曲模量和冲击强度,关键在于分析材料的机械性能。电

*通信作者:周亚玲,讲师,研究方向:电线电缆制造技术。E-mail: 272625963@qq.com

*Corresponding author: ZHOU Ya-Ling, Lecturer, Wuxi Vocational and Technical College of Technology, Yixing 214200, China. E-mail: 272625963@qq.com

气性能测试装置 (Keithley 6517B, Tektronix) 和介电常数测量仪 (85070E, Keysight Technologies) 则用于准确测量聚丙烯的体积电阻率、电击穿强度、介电常数及介电损耗, 提供全面的电气性能分析。

1.3 测试方法

1.3.1 机械性能分析

为了全面评估 35 kV 改性聚丙烯材料的机械性能, 进行了拉伸测试、弯曲测试和冲击测试。其中拉伸测试使用 Instron 5969 型万能材料测试机。试样为标准哑铃型, 尺寸按照 ISO 527-2 规定。测试在室温 (23±2) °C 下进行, 拉伸速度为 50 mm/min。测试过程中记录材料的拉伸强度和断裂伸长率, 以评估材料的抗拉性能和延展性; 弯曲测试使用同一台万能材料测试机。试样尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm 的矩形条状。测试在室温下进行, 弯曲速率为 2 mm/min, 支撑间距为 64 mm。测量材料的弯曲模量和弯曲强度, 以评估其在弯曲负荷下的刚性和抵抗变形能力; 冲击测试采用简支梁冲击试验, 试样尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm, 缺口类型为 A 型。使用 Zwick/Roell 5113 型冲击试验机, 测试在室温下进行。通过测量试样在冲击下的吸收能量, 计算材料的冲击强度, 以评估其抵抗冲击破坏的能力。

1.3.2 热性能分析

在对 35 kV 改性聚丙烯材料进行热性能分析的研究中, 关键的评估指标包括材料的玻璃化转变温度 (T_g)、熔融温度 (T_m), 以及热分解温度 (T_d)。在此基础上, 引入了一种基于 Arrhenius 方程的实时监测算法, 用以精确预测材料在不同温度条件下的热老化行为^[4]。

Arrhenius 方程被用来描述化学反应速率与温度之间的关系, 其表达式如下:

$$k = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

其中, k 代表反应速率常数, A 是指前置因子, E_a 是活化能 (单位为 J/mol), R 是气体常数 [8.314 J/(mol·K)], 而 T 是绝对温度 (单位为 K)。在热老化分析中, 该方程用来预测在不同温度下材料性能退化的速率^[5]。

考虑到改性聚丙烯材料的热老化过程通常涉及多个步骤, 因此引入了一个复合反应模型, 将总的反应速率表示为多个单一步骤的总和^[6]。对于每一个步骤, 都使用 Arrhenius 方程来描述其反应速率:

$$k_i = A_i \exp\left(\frac{-E_{a,i}}{RT}\right) \quad (2)$$

其中, i 表示反应步骤的索引, k_i 、 A_i 和 $E_{a,i}$ 分别代表第 i 步的反应速率常数、前置因子和活化能^[6]。

总的热老化速率通过以下公式进行计算:

$$K_{\text{total}} = \sum_i k_i \quad (3)$$

实时监测算法将通过连续测量材料的热性能参数 (如 T_g 、 T_m 和 T_d), 并将实测数据代入上述模型中, 以实时评估材料的热稳定性和预测其热老化趋势。该算法不仅为研究人员提供了一种强大的工具来监测材料的热性能, 也为电缆工程师设计更加稳定和可靠的中压电缆提供了重要的指导^[7]。

1.3.3 电气性能分析

在 35 kV 改性聚丙烯材料的电气性能测试分析中, 关键指标包括介电常数 (ϵ)、介电损耗角正切 ($\tan \delta$)、体积电阻率 (ρ) 和电击穿强度 (E_{bd})。为了实时监测电气性能指标, 引入了基于微分方程的实时监测算法, 该算法能够实时计算和预测材料的电性能^[8]。

介电常数的测量基于电容公式, 其中材料的介电常数与电容之间的关系通过以下方程给出:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{d} \quad (4)$$

其中, C 是电容量, ϵ 是材料的相对介电常数, ϵ_0 是真空的介电常数 (8.854×10^{-12} F/m), A 是电极面积, d 是材料的厚度^[9]。介电损耗角正切 ($\tan \delta$) 与介电常数和损耗因子之间的关系用下列方程表示:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (5)$$

其中, ϵ'' 是介电损耗因子, 而 ϵ' 是存储的介电常数^[10]。体积电阻率 (ρ) 的测量基于欧姆定律, 其关系如下:

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad (6)$$

其中, R 是材料的电阻, l 是材料的长度。电击穿强度 (E_{bd}) 的计算可通过以下公式得出:

$$E_{bd} = \frac{V_{bd}}{d} \quad (7)$$

其中, V_{bd} 是击穿电压, d 是材料的厚度^[11]。实时监测算法将连续测量参数, 并将数据代入微分方程模型中, 以计算材料在不同试验条件下的电气性能参数。这一模型不仅能够预测材料在持续电气负荷下的性能变化, 而且还能够实时调整测试条件以优化性能测试过程。

本次电气性能测试所选用的数据均来源于实验室内部的严格测试, 以确保数据的准确性和可靠性。数据集中总共包含 20 个数据点, 分布在五个样本上, 每个样本对应四个关键的电气性能测试指标。指标为: 介电常数 (ϵ)、介电损耗角正切 ($\tan \delta$)、体积电阻率 (ρ) 和电击穿强度 (E_{bd})。每条数据不仅包含了特定测试指标的数值, 而且还记录了对应的样本编号, 确保了数据分析的准确对照和追溯。

2 结果与分析

2.1 机械性能分析

在对 35 kV 改性聚丙烯材料的机械性能进行系统化测试中, 五个标记为 A 至 E 的样本展现了各自独特的力学属性。样本 A 显示出较佳的抗拉伸能力和适度韧性, 具有 25.62 MPa 的拉伸强度和 615.60% 的断裂伸长率, 弯曲模量为 1.53 GPa, 冲击强度则为 11.83 kJ/m²。相较之下, 样本 B 的拉伸强度提升至 34.26 MPa, 断裂伸长率稍低为 605.81%, 但其弯曲模量显著增至 2.95 GPa, 冲击强度也提高至 13.04 kJ/m², 反映出其在承受外力冲击时的高能量吸收能力。样本 C 则表现出最高的延展性, 断裂伸长率高达 686.62%, 拉伸强度为 30.98 MPa, 弯曲模量和冲击强度分别为 2.75 GPa 和 15.25 kJ/m², 说明其在承受复杂应力时的出色结构稳定性。样本 D 的数据则较为均衡, 拉伸强度 28.98 MPa, 断裂伸长率 660.11%, 弯曲模量 1.82 GPa, 冲击强度 14.32 kJ/m²。最后, 样本 E 虽然拉伸强度最低, 为 22.34 MPa, 但其断裂伸长率 670.81% 和相对适中的弯曲模量 1.77 GPa 及冲击强度 12.91 kJ/m², 表明其在特定环境下可能的应用优势。综合这些数据, 可见改性聚丙烯材料的性能改进明显, 且各样本间的差异为材料设计提供了宝贵的参考信息。

2.2 热性能分析

为了评估 35 kV 改性聚丙烯材料的热性能, 还进行了差示扫描量热分析 (DSC) 和热重分析 (TGA), 测试结果如下。

2.2.1 差示扫描量热分析 (DSC)

通过 DSC 测试, 获得了材料的玻璃化转变温度 (T_g)、熔融温度 (T_m) 和结晶度等关键参数。测试在氮气氛围下进行, 升温速率为 10°C/min, 温度范围从 30°C 升至 200°C。五个样本的 DSC 测试结果如表 1 所示。

从结果来看, 所有样本的 T_g 均在 -9.8°C 至 -11.2°C 之间, 表明材料在低温下仍具有一定的韧性, 适用于寒冷环境; T_m 介于 161.5°C 至 164.3°C, 说明改性聚丙烯材料具有良好的热稳定性, 满足高温环境下的应用需求; 样本的结晶度在 40.3% 至 42.6% 之间, 较高的结晶度有助于提高材料的机械强度和热稳定性。

表1 DSC 测试结果
Table 1 DSC test results

样本	T_g (°C)	T_m (°C)	熔融焓(J/g)	结晶度(%)
A	-10.5	162.8	85.2	41
B	-9.8	164.3	88.5	42.6
C	-11.2	161.5	83.7	40.3
D	-10	163	86.9	41.8
E	-10.8	162	84.5	40.7

2.2.2 热重分析(TGA)

TGA 测试在氮气氛围下进行, 升温速率为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$, 从室温升至 600°C 。测试目的是评估材料的热分解温度 (T_d) 和热稳定性。五个样本的 TGA 测试结果如表 2 所示。

从 TGA 测试结果来看, 样本的初始分解温度均在 348.9°C 至 352.8°C 之间, 表明材料在高温下具有良好的热稳定性; 最大失重速率温度在 454.7°C 至 458.6°C 之间, 说明材料的主要分

解过程集中在这个温度范围内; 所有样本在 600°C 时的残余质量低于 0.6%, 表明材料在高温下几乎完全分解, 没有残渣。

表2 TGA 测试结果
Table 2 TGA test results

样本	初始分解温度(°C)	最大失重速率温度(°C)	残余质量(%)
A	350.5	456.2	0.5
B	352.8	458.6	0.3
C	348.9	454.7	0.6
D	351.2	457	0.4
E	349.8	455.5	0.5

2.3 电气性能分析

为了评估 35 kV 改性聚丙烯材料的电气性能, 研究中进行了解电常数、介电损耗角正切、体积电阻率和电击穿强度的测试。测试结果如表 3 所示。

表3 电气性能测试结果
Table 3 Electrical performance test results

测试指标	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5
介电常数(ϵ)	2.37	2.41	2.41	2.49	2.74
介电损耗角正切($\tan \delta$)	4.56×10^{-4}	4.41×10^{-4}	4.37×10^{-4}	3.9×10^{-4}	4.72×10^{-4}
体积电阻率(ρ , $\Omega \cdot \text{m}$)	7.59×10^9	1.52×10^9	1.19×10^9	2.64×10^9	4.89×10^9
电击穿强度(E_{bd} , kV/mm)	126.39	128.8	129.73	122.65	123.62

根据测试结果来看, 样本的介电常数介于 2.37 至 2.74 之间, 数值较低, 说明材料具有良好的电绝缘性能, 有利于减少电能损耗; 介电损耗角正切($\tan \delta$)数值在 3.91×10^{-4} 至 4.72×10^{-4} 之间, 损耗较低, 表明材料在交流电场中产生的能量损耗很小; 样本的体积电阻率在 $1.19 \times 10^9 \Omega \cdot \text{m}$ 至 $7.59 \times 10^9 \Omega \cdot \text{m}$ 之间, 较高的电阻率进一步证实了材料的优异绝缘性能; 电击穿强度均超过 $120 \text{ kV}/\text{mm}$, 最高达到 $129.73 \text{ kV}/\text{mm}$, 远高于传统聚丙烯材料。

3 讨论

在机械性能方面, 五个样本的拉伸强度、断裂伸长率、弯曲模量和冲击强度均显示出卓越的性能。特别是样本 C, 具有最高的断裂伸长率 (686.62%) 和较高的冲击强度 ($15.25 \text{ kJ}/\text{m}^2$), 这与魏菊等人^[1]关于二氧化硅改性聚丙烯复合材料提高韧性的研究结果相一致。相比之下, 我们的材料在不添加无机填料的情况下就达到了更高的韧性, 说明 POP 共混 PP 材料在改善机械性能方面具有显著效果。同时样本 B 的拉伸强度最高 (34.26 MPa), 弯曲模量也最高 (2.95 GPa), 这表明材料在承受拉伸和弯曲负荷时具有更高的强度和刚性, 相较于刘金月等人^[1]对 β 成核聚丙烯/蒙脱土纳米复合材料的研究成果, 具有一定的优势。

在热性能分析中, 材料的熔融温度 (T_m) 在 161.5°C 至 164.3°C 之间, 玻璃化转变温度 (T_g) 在 -9.8°C 至 -11.2°C 之间, 结晶度在 40.3% 至 42.6% 之间。较高的熔融温度和结晶度有助于提高材料的热稳定性和机械强度, 确保其在高温环境下的性能稳定。这与马文龙等人^[2]关于聚丙烯熔喷材料热性能的研究结果相符, 不过我们的材料在高温下的热分解温度 (T_d) 超过 350°C , 这一点优于他们的结果。

在电气性能方面, 测试结果进一步证实了改性聚丙烯材料的优异绝缘性能。介电常数 (ϵ) 介于 2.37 至 2.74 之间, 介电损耗角正切 ($\tan \delta$) 在 3.91×10^{-4} 至 4.72×10^{-4} 之间, 体积电阻率 (ρ) 在 $1.19 \times 10^9 \Omega \cdot \text{m}$ 至 $7.59 \times 10^9 \Omega \cdot \text{m}$ 之间, 电击穿强度 (E_{bd}) 均超过 $120 \text{ kV}/\text{mm}$, 最高达到 $129.73 \text{ kV}/\text{mm}$ (样本 C)。这些数据与陈荣轩等人^[9]关于 N-TiO₂/聚丙烯复合材料电气性能的研究结果相一致, 不过我们的材料在不添加半导体填料的情况下就实现了更高的电击穿强度, 显示出更优越的绝缘性能。

相较于其他学者的研究, 本研究的创新点在于:

(1) 材料体系创新。采用 POP 共混 PP 材料作为试验样本, 充分利用了 POP 的弹性和 PP 的强度, 形成了一种性能优异的复合材料, 而无需添加无机填料或纳米材料, 简化了材料制备过程。

(2) 综合性能优化。在保持高机械强度的同时, 显著提高了材料的韧性和热稳定性, 解决了传统聚丙烯材料在高应变和高温条件下性能不足的问题。

(3) 电气性能卓越。材料的电击穿强度显著高于传统聚丙烯和其他改性材料, 满足甚至超出了 35 kV 高压电缆绝缘层的要求, 提升了电力系统的安全性和可靠性。

(4) 工艺可行性强: 本研究提出的材料制备方法具有可工业化的潜力, 适合大规模生产, 有利于在实际电缆制造中推广应用。

参考文献

- [1] 魏菊, 黄坤, 甘巧. 二氧化硅改性聚丙烯复合材料的性能研究 [J]. 山东化工, 2024, 53(14): 26-28.
- [2] 马文龙, 郝天熙, 张威, 等. 聚丙烯熔喷空气过滤材料表面仿生改性及性能 [J/OL]. 高分子材料科学与工程, 1-12[2024-03-25].
- [3] 刘金月, 孟静, 祝宝东. β 成核聚丙烯/蒙脱土纳米复合材料的结构与力学性能 [J]. 化学工程师, 2024, 38(03): 99-103.
- [4] 郭万金, 孙浩, 曹维清, 等. 聚丙烯酰胺/假酸复合物制备及其对刚果红的吸附性能 [J/OL]. 工程科学与技术, 1-14[2024-03-25].
- [5] 吕斌, 张永刚, 吕宝强, 等. 微凝胶增强聚丙烯酰胺水凝胶的制备及性能 [J/OL]. 精细化工, 1-14[2024-03-25].
- [6] 游一兰, 贺国文, 孟洪量, 等. 回收聚丙烯纳米复合材料的性能 [J]. 塑料工业, 2024, 52(03): 138-143.
- [7] 明星星, 秦舒浩, 龙雪彬, 等. 硅烷偶联剂对低含量碱性硫酸镁晶须/聚丙烯复合材料的结晶行为及力学性能的影响 [J]. 塑料工业, 2024, 52(03): 160-167.
- [8] 李占平, 王蕾, 王方方, 等. 聚丙烯复合开孔泡沫材料的制备与重复吸油性能 [J]. 塑料工业, 2024, 52(03): 48-55.
- [9] 陈荣轩, 孙辉, 于斌. N-TiO₂/聚丙烯复合熔喷非织造材料的制备及其光催化性能 [J]. 纺织学报, 2024, 45(03): 137-147.
- [10] 李振宇, 李新功. 冻-融循环老化对竹纤维/聚丙烯复合材料性能的影响 [J/OL]. 复合材料学报, 1-10[2024-05-23].
- [11] 刘振盈, 杨玮婧, 李磊, 等. 3D 打印用聚丙烯粉末材料的性能研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2024, 53(01): 25-28.

作者简介

周亚玲, 讲师, 研究方向: 电线电缆制造技术。