

成型方式对XLPE/OMMT纳米复合材料介电性能的影响

常锦涛¹, 董瑞雪¹, 李秀峰¹, 韩圣斌¹, 李昊泽¹, 马涛²

(1. 山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000;

2. 国网淄博供电公司, 山东 淄博 255000)

摘要:为了研究压制成型法和挤出成型法对纳米复合材料介电性能的影响,分别采用两种成型方式制备了交联聚乙烯/有机化蒙脱土(XLPE/OMMT)纳米复合材料。探讨了不同复合材料中有机化蒙脱土的层间距变化对复合材料电阻-温度特性、介电常数和介质损耗以及电气强度的影响。结果表明:成型加工过程中的力场作用会影响OMMT的插层分散效果;挤出成型过程中的拉伸应力使试样中OMMT片层沿拉伸方向进行取向,形成了规整排列单元,载流子的迁移运动受到阻碍,从而改善了试样的电阻-温度特性;聚合物分子链段的运动受限于取向的片层间,使试样中偶极子的极化率降低,使得介电常数和介质损耗因数减小;同时,OMMT的有效插层与聚合物形成的杂化结构使电子产生漫反射现象,延长了电子运动路径,提高了挤出成型试样的电气强度。

关键词:交联聚乙烯;蒙脱土;成型方式;微观结构;介电性能

中图分类号:TM215 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.03.006

Effect of molding method on dielectric properties of XLPE/OMMT nanocomposites

CHANG Jintao¹, DONG Ruixue¹, LI Xiufeng¹, HAN Shengbin¹, LI Haoze¹, MA Tao²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. State Grid Zibo Power Supply Company, Zibo 255000, China)

Abstract: In order to study the effects of compression molding and extrusion molding on the dielectric properties of nanocomposites, these two molding methods were used to prepared the crosslinked polyethylene/organic montmorillonite (XLPE/OMMT) nanocomposites, respectively. The effects of the interlayer spacing change of OMMT in different composites on the resistance-temperature characteristics, dielectric constant, dielectric loss, and electric strength of the composites were discussed. The results show that the force field effect during the molding process can affect the intercalation dispersion effect of OMMT. The tensile stress during extrusion molding makes the OMMT sheets in the sample orient along the tensile direction, and form a regular arrangement unit, which hinders the migration of carriers, thereby improving the resistance-temperature characteristics of the sample. The movement of polymer molecular segments is limited between the oriented lamella, which makes the dipole in the sample decrease, and the dielectric constant and dielectric loss factor decrease. At the same time, the effective intercalation of OMMT and the hybrid structure formed by the polymer cause diffuse reflection of electrons, extending the electron motion path, and improving the electric strength of the extruded sample.

Key words: crosslinked polyethylene; montmorillonite; molding method; microstructure; dielectric properties

0 引言

聚合物基纳米复合材料是将填料以纳米尺度均匀分散于聚合物中形成的复合体系^[1],纳米掺杂改性聚合物可以使复合材料在电学性能、热学性能和力学性能等方面优于传统聚合物。影响复合材料性能的因素多种多样,其中纳米填料与聚合物基体之间的界面作用^[2]、纳米颗粒的分布情况^[3]以及纳米颗粒的存在形式^[4]起到主要影响作用。王思蛟等^[5]制备了聚乙烯/氧化铝纳米复合材料,并对其介

电性能进行研究,发现掺杂纳米氧化铝后,复合材料界面区域的陷阱数量增加,捕获电荷的能力提高,使聚乙烯中空间电荷的积聚和电场的畸变现象得到显著改善。B ZAZOUM等^[6]研究发现经表面处理剂修饰的二氧化钛在低密度聚乙烯中实现了良好分散,界面极化现象得到显著改善,材料介质损耗降低,电气强度明显提高。黄兴溢等^[7]制备了低密度聚乙烯/氮化硼纳米复合材料,探究了纳米氮化硼形状与复合材料介电性能之间的关联规律,发现

球状氮化硼在聚合物中的分散状态最佳,同时与基体之间的界面作用力较强,对空间电荷注入的抑制效果较为显著;而片状氮化硼对载流子起到散射阻碍作用,使复合材料的电气强度明显提高。纳米复合材料的性能在一定程度上还依赖于成型加工过程中填料在基体中所形成的取向结构^[8]。S MOR-TAZAVIAN等^[9]研究了纤维取向对短玻璃纤维增强热塑性塑料拉伸性能的影响,发现拉伸强度和弹性模量沿纤维取向方向到垂直于纤维取向方向显著降低。ZHONG B等^[10]通过双辊铣削制备了具有定向纳米氮化硼的硅橡胶/氮化硼纳米复合材料,研究发现与随机分散纳米氮化硼的复合材料相比,具有定向结构的纳米复合材料热导率提高了22%。A P S ZANATTA等^[11]通过磁场对纳米蒙脱土进行诱导,定向制备了低密度聚乙烯复合材料,结果发现诱导过程能够使纳米颗粒在聚合物中沿磁场方向发生有效排列,充分发挥了屏障效应,改善了复合材料的热稳定性。

纳米复合电介质宏观性能与其多层次结构密切相关^[12]。蒙脱土(MMT)具有独特片层状结构,其在聚合物基体中的分散状态和取向状态会影响纳米复合材料微观结构的不确定性及其介电性能^[1]。电缆绝缘线芯的工厂生产采用连续的三层共挤方法,而绝缘材料的实验室研究一般采用平板硫化机的压制成型方式,两种成型方式的等效性或差异性值得探讨。众所周知,挤出和压制成型所施加的外部剪切力将影响MMT的有效插层和片层取向排列,聚乙烯交联过程产生的分子间作用力将二次影响MMT的层间距^[13],热老化过程中聚合物聚集态结构的完善将再次影响MMT的片层间距及取向排列^[14],因此有必要深入系统研究电气绝缘材料的制备工艺因素通过影响MMT的分散状态和微观形态稳定性,进而对其介电性能的影响机理。

为了对比两种成型方式制备试样的性能差异,采用压制成型法和挤出成型法分别制备XLPE/OMMT纳米复合材料。采用小角X射线衍射对不同复合材料中有机化蒙脱土的层间距进行测量;并通过测试试样的电气参数,探讨成型方式对XLPE/OMMT纳米复合材料介电性能的影响。

1 实验

1.1 主要原材料

纳米蒙脱土,采用十八烷基苄基季铵盐进行预插层处理得到有机化蒙脱土,浙江丰虹新材料股份有限公司生产;35 kV可交联聚乙烯(crosslinked

polyethylene, XLPE)粒料,采用型号为2220H的聚乙烯粒料(polyethylene, PE)与过氧化二异丙苯(DCP)和抗氧剂熔融混合造粒而成,南京中超新材料股份有限公司生产;马来酸酐接枝料(PE-g-MAH),自制。

1.2 试样制备

母料制备:按一定比例将聚乙烯(polyethylene, PE)、马来酸酐接枝料(PE-g-MAH)与有机化蒙脱土在双辊筒开炼机上熔融共混,制得OMMT质量分数为20%的母料。

压制成型试样:分别把质量分数为1%、2.5%、5%、10%、15%的母料加入到XLPE粒料中熔融共混,在100℃下混炼15 min。出料后,在平板硫化机上不加压预热,然后以温度为175℃、压力为15 MPa的条件对XLPE/OMMT压制15 min,冷却至室温,制得OMMT质量分数分别为0.2%、0.5%、1.0%、2.0%、3.0%,厚度为1 mm的XLPE/OMMT压制成型试样若干。

挤出成型试样:在工业生产中,电缆绝缘线芯是三层共挤后进入硫化管道中加压交联。由于实验环境受限,为了模拟实际生产过程中绝缘料挤出后的加压交联过程,将母料按1%、2.5%、5%、10%、15%的质量分数与XLPE粒料混合,利用转矩流变仪挤出条状试样,然后将制备得到的条状试样顺应挤出方向层叠放置,再加压进行交联,制得OMMT质量分数分别为0.2%、0.5%、1.0%、2.0%、3.0%,厚度为1 mm的XLPE/OMMT挤出成型试样若干。

各试样的组成成分及编号如表1所示,制备流程图如图1所示。

表1 各试样的组成成分及编号
Tab.1 Composition and number of each sample

成型方式	试样	质量分数/%		编号
		XLPE	OMMT	
压制成型	XLPE	100.0	—	P-XLPE
	XLPE/OMMT	99.8	0.2	P-XLPE/OMMT-0.2%
		99.5	0.5	P-XLPE/OMMT-0.5%
		99.0	1.0	P-XLPE/OMMT-1.0%
		98.0	2.0	P-XLPE/OMMT-2.0%
		97.0	3.0	P-XLPE/OMMT-3.0%
挤出成型	XLPE	100.0	—	E-XLPE
	XLPE/OMMT	99.8	0.2	E-XLPE/OMMT-0.2%
		99.5	0.5	E-XLPE/OMMT-0.5%
		99.0	1.0	E-XLPE/OMMT-1.0%
		98.0	2.0	E-XLPE/OMMT-2.0%
		97.0	3.0	E-XLPE/OMMT-3.0%

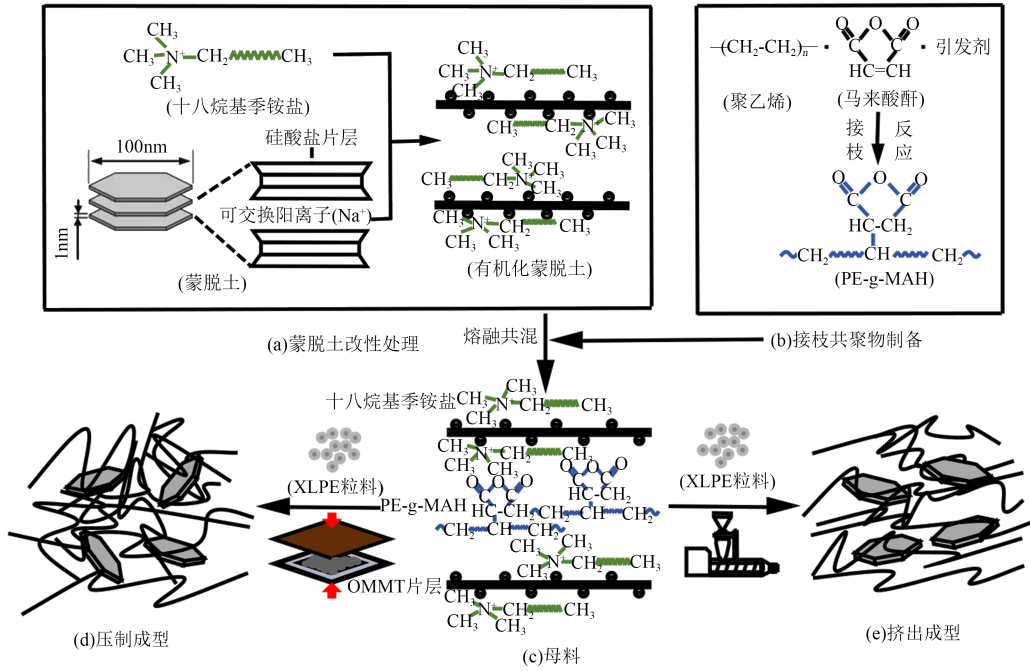


图1 试样制备流程图

Fig.1 Sample preparation flow chart

1.3 性能测试

小角X射线衍射:采用德国BRUKER公司制造的D8 ADVANCE型射线衍射仪测量不同插层情况下OMMT的片层间距变化,步长为0.02步,扫描速度为0.1 s/步,扫描角度为 $1.5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 。根据式(1)所示Bragg方程^[10]计算OMMT的层间距。

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

式(1)中: d 为晶面间距(层间距); θ 为入射角; λ 为入射波波长; n 为衍射等级。

电阻-温度特性:根据三电极系统原理,采用ZC36型高阻计分别在25、40、60、80、90℃下对试样的电阻-温度特性进行测试,试样厚度为1 mm,实验电压为1 kV。

西林电桥测试:采用QS87型高精度高压西林电桥测试各试样的介电常数和介质损耗因数,试样厚度为1 mm。

工频耐压测试:采用TYJK-50型击穿电压测试仪对试样进行电气强度(E_0)测试,升压速率为2 kV/s。试样采用直径为120 mm、厚度为1 mm的圆形试片。每种试样制备3个试片,每个试片测试5个点的厚度,取其厚度平均值。每个试片测试5个击穿点,按照 $E_0 = U/d$ (U 为击穿电压, d 为厚度)计算电气强度,共计15个有效电气强度值进行Weibull分布分析。

2 结果与讨论

2.1 成型方式对OMMT分散状态的影响

为了表征不同插层情况下OMMT的片层间距

变化规律,采用小角X射线衍射对OMMT的层间距进行测量。图2为MMT、OMMT、母料以及不同成型方式制备的纳米复合材料的小角X射线衍射(XRD)图谱,根据图示衍射峰峰位,由Bragg方程^[15]计算得到OMMT在复合材料中的层间距数据,如表2所示。

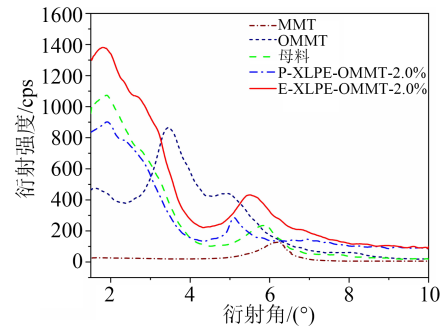


图2 试样的XRD图

Fig.2 XRD pattern of samples

表2 试样的层间距数据

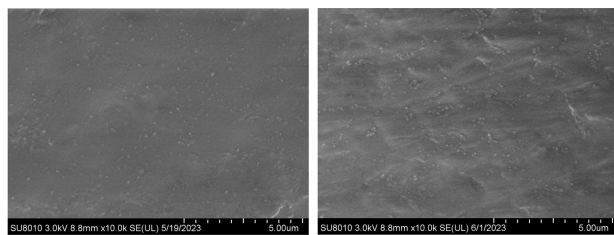
Tab.2 Interlayer spacing data of different samples

试样	衍射角/(°)	层间距/nm	变化率/%
MMT	6.20	1.42	—
OMMT	3.45	2.55	79.6
母料	1.90	4.65	227.5
P-XLPE/OMMT-2.0%	1.85	4.77	235.9
E-XLPE/OMMT-2.0%	1.82	4.85	241.5

由图2和表2可知,MMT的衍射角为 6.20° ,层间距为 1.42 nm ^[16]。预插层处理后,OMMT的峰位

向左偏移,层间距扩大至 2.55 nm,增大了 79.6%,表明 OMMT 实现了良好预插层。与 OMMT 粉末相比,母料中 OMMT 的衍射角由 3.45° 移至 1.90°,层间距从 2.55 nm 扩大至 4.65 nm。可见在相容剂 PE-g-MAH 的协助下,分子链段上的马来酸酐基团与 OMMT 中的胺基正离子实现了极性匹配,进入片层间扩大了 OMMT 的片层间距。两种成型方式制备的试样中 OMMT 层间距又进一步扩大,其中压制成型试样中 OMMT 的层间距扩大至 4.77 nm,挤出成型试样中 OMMT 的层间距扩大至 4.85 nm,表明 OMMT 在复合材料中均实现了剥离分散状态^[17]。分析认为,成型过程中的应力作用使 OMMT 片层产生相对滑移,减弱了片层间的凝聚力,而 PE-g-MAH 相容剂与 OMMT 中有机插层剂的烷基链作用产生焓变,补偿了插层过程中熵的损失,使聚合物容易插层^[18]。由于压制成型中应力作用的焓补偿和剪切作用较弱,使得压制成型试样中 OMMT 的层间距小于挤出成型试样。

为了进一步分析 OMMT 在聚合物基体中的分散状态,对试样的断面形貌进行了观察,显微镜放大倍数为 10 000 倍,结果如图 3 所示。



(a)P-XLPE OMMT-2.0% (b)E-XLPE OMMT-2.0%

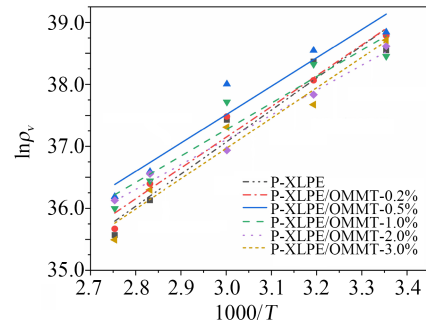
图3 纳米复合材料的 SEM 图

Fig.3 SEM images of nanocomposites

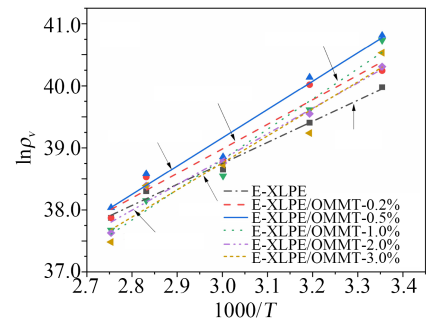
图 3 中浅白色颗粒为交联聚乙烯基体中的纳米 OMMT,从图中可以看出,在 XLPE 基体中,OMMT 分布较均匀,无明显的纳米团聚颗粒,且挤出成型试样中的 OMMT 较压制成型的 OMMT 呈现明显的取向分布结构。

2.2 成型方式对纳米复合材料体积电阻率的影响

载流子的浓度及其迁移运动是造成纳米复合材料体积电阻率(ρ_v)出现差异的主要原因。聚合物中载流子浓度与体积电阻率呈现负相关的变化规律,而束缚势垒(μ_0)的大小决定了纳米复合材料中载流子迁移运动的强弱。束缚势垒(即活化能)由 $\ln\rho_v \sim (1/T)$ 的直线斜率来表征^[19],势垒越大,载流子迁移率越低。各试样的体积电阻率随温度变化的拟合曲线如图 4 所示,得到不同试样的活化能数据如表 3 所示。



(a)压制成型试样



(b)挤出成型试样

图4 体积电阻率随温度变化关系图

Fig.4 The relationship between volume resistivity and temperature

表3 XLPE 及其纳米复合材料的活化能

Tab.3 Activation energy of XLPE and its nanocomposites

成型方式	试样	活化能/eV
压制成型	P-XLPE	0.30
	P-XLPE/OMMT-0.2%	0.32
	P-XLPE/OMMT-0.5%	0.38
	P-XLPE/OMMT-1.0%	0.37
	P-XLPE/OMMT-2.0%	0.31
	P-XLPE/OMMT-3.0%	0.33
	挤出成型	E-XLPE
E-XLPE/OMMT-0.2%		0.41
E-XLPE/OMMT-0.5%		0.48
E-XLPE/OMMT-1.0%		0.45
E-XLPE/OMMT-2.0%		0.43
E-XLPE/OMMT-3.0%		0.33

从图 4 可以看出,对于纯 XLPE 而言,挤出成型试样的体积电阻率高于压制成型试样。在测试温度范围内,压制成型试样和挤出成型试样的体积电阻率均随温度的升高而相应递减。分子链在成型加工过程中受到拉伸应力作用而发生取向,排列趋于平行规整,使聚合物中的自由体积减少^[20],载流子的运动能力受到限制,迁移率降低,体积电阻率增大。随着温度升高,试样内部的热运动能力增强,载流子在热激发作用下活性增强^[21],迁移率增大,从

而使纳米复合材料的体积电阻率减小。

对于XLPE/OMMT纳米复合材料而言,试样的体积电阻率随填料含量的增加都呈现出先升高后降低的变化趋势。在填料含量较低时,体积电阻率较大;当填料含量超过某一界限时,体积电阻率减小。随着温度逐渐升高,体积电阻率呈现减小的变化趋势。体积电阻率增大的原因主要有两方面:一方面,OMMT加入到XLPE基体中,由于其具有大的比表面积,使得填料与基体之间形成了较多的界面区域,同时二者之间形成了较强的界面作用力^[22],限制了载流子的迁移;另一方面,纳米OMMT在相容剂的作用下与基体之间形成较深的陷阱能级^[23],使入陷载流子无法脱陷,从而导致体积电阻率增大。当OMMT含量较高时,部分OMMT充当复合材料中的杂质离子^[24],增大了载流子浓度,且纳米OMMT与聚合物基体之间的界面作用力降低,从而对载流子迁移运动的限制作用减弱^[13],导致体积电阻率减小。而温度升高后,被束缚的载流子受热激发跨越势垒参与迁移,电导率增加,同时OMMT与XLPE的界面结合力减弱,分子间作用力下降,对载流子运动的束缚力减小,导致体积电阻率随温度升高而减小。在相同OMMT添加量下,与压制成型试样相比,挤出成型制备的XLPE/OMMT纳米复合材料体积电阻率明显增大。由图5的载流子迁移示意图可知,挤出成型试样中OMMT片层的规整叠列赋予了聚合物“架层”结构,有利于阻碍载流子的定向运动^[22],表明复合材料内部纳米片层的分散情况所决定的取向状态是影响材料绝缘性能的重要因素。

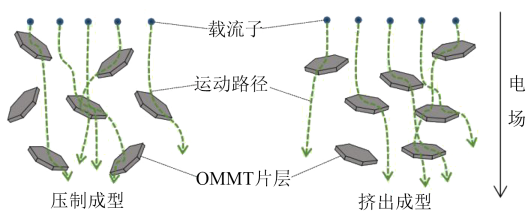


图5 载流子迁移示意图

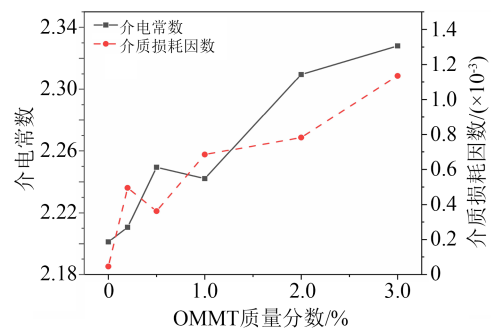
Fig.5 Schematic diagram of carrier migration

从图4和表3可以看出,不同成型工艺制备的纳米复合材料活化能随温度的变化趋势与体积电阻率的变化趋势相似。温度升高,聚合物内部晶区之间及晶区与非晶区的晶界势垒减小,离子热运动下通过晶界附近的隧道效应实现跃迁所需的能量减小^[25],活化能降低。随着OMMT含量的增加,两种成型方式制备的试样活化能都呈现出先升高后下降的趋势,在质量分数为0.5%时活化能达到最大值。少量掺杂OMMT时,剥离分散的OMMT片层

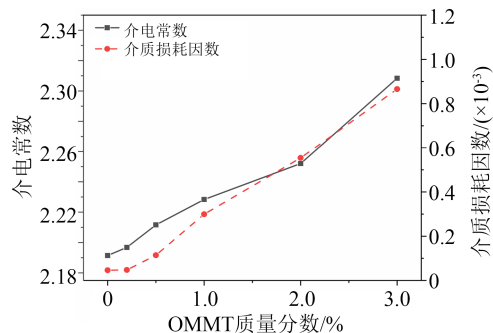
与交联聚乙烯基体的界面交互区增多,同时区域内深陷阱密度增加^[26],更容易吸附载流子,而入陷载流子需要更多能量脱陷,导致势垒能级增加,活化能升高^[27]。随着掺杂量的进一步增加,OMMT分散性变差,对载流子的阻碍能力减弱,同时过多的填料可能导致相邻陷阱势垒的相互交叠^[28],降低了陷阱深度,因此需要克服的势垒能级降低,活化能降低。在OMMT含量相同时,挤出成型试样较压制成型试样的活化能高。这是因为高剪切的挤出作用力减少了纳米粒子发生团聚的可能^[29],均匀分散的OMMT颗粒在基体内部形成更多的陷阱、更强的界面作用力,对载流子的捕获和束缚能力增强,参与导电的载流子数量减少,使得材料的势垒升高,活化能升高。

2.3 成型方式对纳米复合材料介电性能的影响

对各试样进行介电常数与介质损耗因数测试,结果如图6所示。



(a)压制成型试样



(b)挤出成型试样

图6 纳米复合材料的介电性能

Fig.6 Dielectric properties of nanocomposites

从图6可以看出,对于纯XLPE而言,压制成型试样的介电常数和介质损耗因数与挤出成型试样的相差不大。而两种成型方式制备的XLPE/OMMT纳米复合材料介电常数与介质损耗因数随OMMT含量的增加,总体上呈现逐渐增大的趋势。经有机插层剂改性的蒙脱土为聚合物基体引入了极性分子基团,聚合物基体内极性基团数目增多,增

大了偶极子的转向极化率,从而使复合材料的介电常数和介质损耗因数增大。随 OMMT 含量的增加,纳米填料在基体中的分散程度逐渐变差,出现团聚现象,引起界面效应下降^[30],无法有效限制偶极子的转向极化,导致介电常数增大;同时由于 MMT 经过表面修饰之后引入了大量的极性基团,使交联聚乙烯基体在承受交变电场时除了产生电导损耗之外,还产生了大量松弛损耗,导致介质损耗因数增大。

与压制成型制备的 XLPE/OMMT 纳米复合材料相比,在相同 OMMT 含量下,挤出成型制备的 XLPE/OMMT 复合材料介电常数和介质损耗因数均明显减小。一方面,挤出成型过程中施加的拉伸应力使 OMMT 和聚合物分子链定向排列,聚合物基体分子链被限制在 OMMT 片层之间,造成偶极子极化困难,发生取向极化的概率减小;另一方面,挤出作用使部分 XLPE 分子链由缠结态向伸展态转化,规整排列的分子链段数量增多,有助于晶体的形成^[31],材料结晶程度明显提高,而结晶完善的聚合物中偶极子受到更强的束缚作用^[32],运动能力较弱,松弛程度降低,使得介电常数与介质损耗因数减小。而在压制成型试样中,纳米填料在基体中杂乱分散,可能出现局部团聚,团聚体与基体之间的界面作用力减弱^[4],极化能力提高,介质损耗增大,因此压制成型试样的介电常数和介质损耗因数大于挤出成型试样。

2.4 成型方式对纳米复合材料击穿特性的影响

采用 Weibull 分布函数分析了不同成型方式制备试样的工频击穿特性,结果如图 7 所示,Weibull 分布参数列于表 4 中。

从图 7 和表 4 可以看出,随着 OMMT 含量的增加,XLPE/OMMT 纳米复合材料的电气强度先升高后下降,数据分散性减小。在 OMMT 质量分数为 0.5% 时,压制成型试样和挤出成型试样的电气强度都达到最大值,且数据分散性最小。一方面,少量掺杂 OMMT 有利于形成剥离型结构的复合材料,使得纳米粒子的小尺寸、大比表面积的特性得到更好地发挥,从而形成良好的界面结构,提高了电子发生跃迁的势垒,对自由电子的迁移起到抑制效果^[34];另一方面,OMMT 片层在基体中剥离均匀分散,其本身具有的优良阻隔特性使电子在复合材料内传输时通过碰撞而减速,从而提高了复合材料的电气强度^[35]。而过多添加纳米填料会导致 OMMT 在基体树脂中分散不均,出现局部团聚^[33],与基体间形成微观缺陷;同时 OMMT 片层之间的距离随着 OMMT 含量增加而减小,相邻 OMMT 占据的空间可能

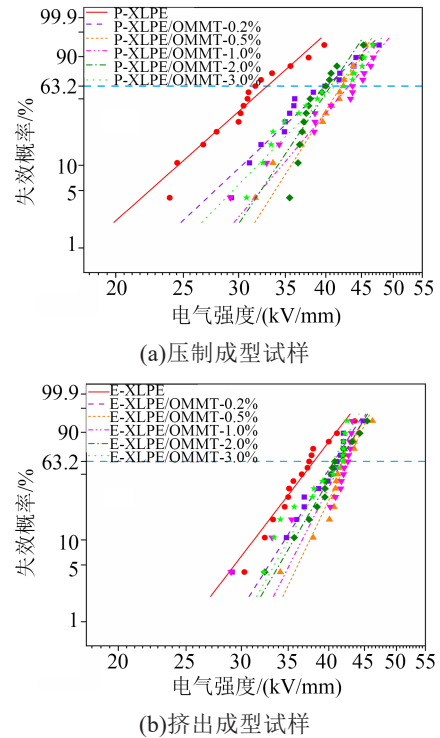


图 7 试样的击穿特性

Fig.7 Breakdown characteristic of samples

表 4 XLPE 及其纳米复合材料的击穿特征参数

Tab.4 Breakdown characteristic parameters of XLPE and its nanocomposites

试样	OMMT 质量分数/%	尺寸参数 /(kV/mm)	形状参数
P-XLPE	—	33.3	7.6
P-XLPE/OMMT-0.2%	0.2	40.0	8.1
P-XLPE/OMMT-0.5%	0.5	42.5	13.6
P-XLPE/OMMT-1.0%	1.0	41.8	10.2
P-XLPE/OMMT-2.0%	2.0	41.2	12.9
P-XLPE/OMMT-3.0%	3.0	40.6	8.8
E-XLPE	—	38.1	11.4
E-XLPE/OMMT-0.2%	0.2	40.7	13.9
E-XLPE/OMMT-0.5%	0.5	43.2	18.3
E-XLPE/OMMT-1.0%	1.0	42.2	17.2
E-XLPE/OMMT-2.0%	2.0	41.5	15.5
E-XLPE/OMMT-3.0%	3.0	40.4	14.9

会部分重合,出现界面的交叠现象^[36],有可能形成较长且连续的周期性势场,提高了电子在界面内的迁移率,使得电子在迁移中从外施电场获得较高能量的概率增大^[37],最终导致材料的击穿性能下降。从表 4 可知,对纯 XLPE 而言,挤出成型试样的尺寸参数和形状参数明显高于压制成型试样,可见挤出成型提高了试样的电气强度,且数据分散程度减小。在挤出成型过程中的拉伸取向使 XLPE 分子链排列

更加规整,有助于减小非晶区域面积,使材料结晶度升高^[33],内部结构变得致密,从而使试样具有较高的电气强度。

与压制成型试样相比,在相同OMMT含量下,挤出成型试样的尺寸参数和形状参数明显提高,其中E-XLPE/OMMT-0.5%试样仍保持较好的电气强度和分散性。这是由于挤出成型试样中存在多层次的取向结构单元,这种OMMT的有效插层与聚合物形成的杂化结构在聚合物基体中会发生电子漫反射现象^[38],增加了电子运动路径,并且减少了高能电子对聚合物基体的轰击,因此提高了复合材料的电气强度。由此可知纳米OMMT在聚合物中的取向状态会影响复合材料的电气强度。

3 结论

(1)纳米颗粒在基体树脂中的熔融分散状态取决于成型加工过程中的应力作用和相容剂的协同效果。应力作用使OMMT片层间的凝聚力减弱,而PE-g-MAH的协助作用使基体分子链能更容易地插入OMMT片层间形成剥离型纳米复合结构体系。

(2)挤出成型试样中OMMT片层沿取向方向规整排列,有效阻碍了载流子的定向运动,使复合材料的体积电阻率增大。

(3)聚合物分子链的运动受到取向OMMT片层限制,同时高剪切的挤出作用降低了局部团聚出现的可能,两相界面作用力增强,降低了偶极子的极化率,从而使挤出成型试样具有较小的介电常数和介质损耗因数。

(4)挤出成型试样内部形成多层次取向单元结构,OMMT片层的叠列结构减缓了自由电子对聚合物基体的冲击,从而显著提高了纳米复合材料的电气强度。

参考文献:

- [1] 雷清泉,李盛涛.关于工程电介质中几个经常涉及的问题与思考[J].高电压技术,2015,41(8):2473-2480.
- [2] 程相英,尹训茜.聚合物基复合电介质材料的研究进展[J].绝缘材料,2019,52(3):7-11.
- [3] 贺亚娜,徐任信.TiO₂纳米颗粒增强LDPE复合电介质的绝缘性能研究[J].绝缘材料,2017,50(7):26-30,35.
- [4] 郭美娇,刘玉平,周政,等.钛酸钡填料形状对其聚合物复合材料介电性能的影响[J].绝缘材料,2019,52(8):1-5.
- [5] 王思蛟,查俊伟,王俊甫,等.纳米Al₂O₃对低密度聚乙烯高压直流电缆绝缘材料性能影响研究[J].中国电机工程学报,2016,36(24):1-5.
- [6] ZAZOUM B, FRECHETTE M, DAVID E. LDPE/TiO₂ nanocomposites: Effect of POSS on structure and dielectric properties[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(5):2505-2507.
- [7] 黄兴溢,张强,江平开.纳米颗粒形状对线性低密度聚乙烯纳米复合电介质电学性能的影响[J].中国电机工程学报,2016,36(24):6606-6611.
- [8] WU T, HUANG Z X, WANG D Z, et al. Effect of continuous elongational flow on structure and properties of short glass fiber reinforced polyamide 6 composites[J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2019, 2(3):93-101.
- [9] MORTAZAVIAN S, FATEMI A. Effects of fiber orientation and anisotropy on tensile strength and elastic modulus of short fiber reinforced polymer composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 72:116-129.
- [10] ZHONG B, ZOU J X, AN L L, et al. The effects of the hexagonal boron nitride nanoflake properties on the thermal conductivity of hexagonal boron nitride nanoflake/silicone rubber composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 127:105629.
- [11] ZANATTA A P S, DAITX T S, CARLI L N, et al. Induced orientation of magnetic bentonite nanoparticles to produce low-density polyethylene nanocomposites[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022, 549:169015.
- [12] 田付强,杨春,何丽娟,等.聚合物/无机纳米复合电介质介电性能及其机理最新研究进展[J].电工技术学报,2011,26(3):1-12.
- [13] 董芸滋,高娜,李秀峰,等.交联度对交联聚乙烯/有机蒙脱土纳米复合材料拉伸性能和介电性能的影响[J].电工技术学报, 2023, 38(5):1154-1165.
- [14] 许庆重,李秀峰,邓繁盛,等.交联行为对XLPE/OMMT纳米复合材料结构和介电性能的影响[J].中国电机工程学报,2023,43(2):843-853.
- [15] 吕斌,马建中,高党鸽,等.改性菜籽油/有机蒙脱土纳米复合材料的制备及性能[J].高分子材料科学与工程,2013,29(9):147-151,156.
- [16] LI X F, XU M, ZHANG K, et al. Influence of organic intercalants on the morphology and dielectric properties of XLPE/montmorillonite nanocomposite dielectrics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(4):1705-1717.
- [17] GOH P S, ISMAIL A F, NG B C. Directional alignment of carbon nanotubes in polymer matrices: Contemporary approaches and future advances[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 56:103-126.
- [18] 张晓虹,高俊国,郭宁,等.纳米蒙脱土对聚乙烯击穿和电导特性的影响[J].高电压技术,2009,34(1):129-134.
- [19] 张灵,陈健宁,周远翔,等.聚合物绝缘空间电荷动力学的理论模型与数值仿真研究进展[J].中国电机工程学报,2022,42(8):3037-3055.
- [20] 谢高艺,全大萍,王小妹,等.低介电聚合物材料研究进展[J].绝缘材料,2021,54(9):15-29.
- [21] 吉雅坤,李卫国,张翀,等.低温环境下环氧树脂氧化铝复合材料的介电性能变化规律研究[J].绝缘材料,2018,51(2):35-38.
- [22] 李秀峰,彭云舜,徐曼,等. XLPE/OMMT 纳米复合材料电导和击穿性能[J].高电压技术,2017,43(9):2849-2856.
- [23] 高宇,王小芳,杜伯学,等.聚合物绝缘材料载流子陷阱的表征

- 方法及陷阱对绝缘击穿影响的研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(7):2219-2230.
- [24] 李果,李秀峰,申晋,等. 交联行为对纳米复合电介质电导特性和电气强度的影响[J]. 绝缘材料, 2019, 52(3):25-30, 35.
- [25] 陈少卿,成霞,王霞,等. 纳米氧化锌/聚乙烯复合材料中空间电荷及体积电阻率的研究[J]. 绝缘材料, 2007, 40(2):48-50, 53.
- [26] 吴建东,尹毅,兰莉,等. 纳米填充浓度对LDPE/Silica纳米复合介质中空间电荷行为的影响[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28):177-183, 2.
- [27] 于凡,周焱,李维康,等. 纳米粒子对交联聚乙烯直流电缆中绝缘电阻率温度系数的影响[J]. 绝缘材料, 2019, 52(10):87-93.
- [28] 陈曦,吴锴,王霞,等. 纳米粒子改性聚乙烯直流电缆绝缘材料研究(I)[J]. 高电压技术, 2012, 38(10):2691-2697.
- [29] 章明秋,容敏智,阮文红. 非层状纳米无机粒子/热塑性聚合物复合材料制备方法研究进展[J]. 复合材料学报, 2011, 28(5):1-11.
- [30] 万宝全,郑明胜,查俊伟. 聚酰亚胺复合储能电介质材料研究进展[J]. 绝缘材料, 2021, 54(11):23-33.
- [31] 陶园园. 拉伸取向对聚乙烯及其共混物力学和老化性能的影响研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2009.
- [32] 谢大荣,巫松桢. 电工高分子物理[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1990.
- [33] 王永宁,鲁轩,闫立东,等. 氨基化改性BN纳米片对环氧表面绝缘特性的影响[J]. 绝缘材料, 2021, 54(9):48-54.
- [34] WANG S J, LUO Z, LIANG J J, et al. Polymer nanocomposite dielectrics: Understanding the matrix/particle interface[J]. ACS Nano, 2022, 16(9):13612-13656.
- [35] ALBOZAHID M, NAJI H Z, ALOBAD Z K, et al. Effect of OMMT reinforcement on morphology and rheology properties of polyurethane copolymer nanocomposites[J]. Journal of Elastomers & Plastics, 2021, 53(8):992-1014.
- [36] 李明专,胡孝迎,何敏,等. 环氧树脂改性聚乳酸/低熔点尼龙6/蒙脱土纳米复合材料结构与性能[J]. 化工进展, 2019, 38(6):2880-2888.
- [37] 谢东日,李盛涛,康文斌,等. 纳米复合电介质击穿与耐电晕性的纳米掺杂效应[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19):5909-5918, 5949.
- [38] 高俊国,赵贺,张晓虹,等. 纳米SiO₂/低密度聚乙烯复合材料的陷阱特性与电击穿机制[J]. 复合材料学报, 2019, 36(4):801-810.

收稿日期:2023-04-14;修回日期:2023-06-05。

作者简介:常锦涛(1997-),男(汉族),山东德州人,硕士生,主要从事高电压与绝缘技术的研究;李秀峰(1974-),女(汉族),山东青岛人,副教授,博士,主要从事电缆料及电缆附件关键问题与技术,纳米复合电介质特性及应用,电力设备绝缘结构优化设计的工作。