

KH-SiO₂/PES/BMI-F51 复合材料的介电性能

Dielectric properties of KH-SiO₂/PES/BMI-F51 composites

陈宇飞^{1,2}, 耿成宝¹, 郭红缘¹, 岳春艳¹, 柴铭苗¹

(1 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040; 2 哈尔滨理工大学 工程电介质及应用技术教育部重点实验室, 哈尔滨 150080)

CHEN Yu-fei^{1,2}, GENG Cheng-bao¹, GUO Hong-yuan¹,

YUE Chun-yan¹, CHAI Ming-zhuo¹

(1 School of Materials Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China; 2 Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application (Ministry of Education), Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

摘要: 采用 3-缩水甘油醚氧基丙基三甲氧基硅烷(KH-560)修饰纳米二氧化硅(nano-SiO₂)获得改性纳米二氧化硅(KH-SiO₂)。以酚醛环氧树脂(F51)和双马来酰亚胺(BMI)作为基体,添加 4%(质量分数,下同)聚醚砜(PES)和不同含量(0.5%~2.5%)的 KH-SiO₂,制备 KH-SiO₂/PES/BMI-F51 多相复合材料。红外光谱(FT-IR)、扫描电镜(SEM)和透射电镜结果表明:纳米 SiO₂ 表面修饰效果良好,纳米粒子团聚倾向减弱,粒径减小,比表面积增大。介电性能测试结果表明:随着 KH-SiO₂ 掺杂量的增加,材料的介电常数先降低后升高,介电损耗没有明显变化,体积电阻率和击穿强度先升高后降低。当 KH-SiO₂ 掺杂量为 1.5%时,10Hz 下介电常数和介电损耗角正切分别为 4.55 和 0.0029,体积电阻率和击穿强度分别为 $1.74 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ 和 29.11kV/mm,比树脂基体提高了 68.9%和 35.9%。

关键词: 双马来酰亚胺;酚醛环氧;聚醚砜;二氧化硅;介电性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2018.001048

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2019)08-0103-07

Abstract: KH-SiO₂ was obtained by using 3-glycid-oxypopyl-trimethoxy-silane (KH-560) to modify nano-silica (nano-SiO₂). KH-SiO₂/PES/BMI-F51 multi-phase composite was prepared, the phenolic epoxy resin (F51) and bismaleimide (BMI) as the matrix, 4% (mass fraction, the same below) polyethersulfone (PES) as toughening agent and different contents (0.5%-2.5%) of KH-SiO₂ as modifier. The results of Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), scanning electron microscope (SEM) and transmission electron microscope (TEM) show that the surface modification of nano-SiO₂ is favourable, the agglomeration tendency of nanoparticles is weakened, the size is decreased and the specific surface area is increased. Dielectric properties test displays that the dielectric constant of the material is decreased first and then increased with the increase of doping amount of KH-SiO₂. There is no significant change in dielectric loss tangent, and the volume resistivity and breakdown strength are increased first and then decreased. The dielectric constant and dielectric loss tangent of composite reach 4.55 and 0.0029 at 10Hz, respectively, when the doping amount of KH-SiO₂ is 1.5%. The volume resistivity and breakdown strength are $1.74 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ and 29.11kV/mm, respectively, which are 68.9% and 35.9% higher than that of resin matrix.

Key words: bismaleimide; polyethersulfone; phenolic epoxy; silica; dielectric property

随着时代的进步与技术的发展,在电气绝缘的一些高精尖领域,对绝缘材料的综合性能提出了更高的

要求,提高材料性能是必然的发展趋势。酚醛环氧树脂具有很好的化学稳定性、耐腐蚀性以及电绝缘性,与

传统的环氧树脂相比,其综合性能优异^[1];双马来酰亚胺树脂(BMI)的耐热性突出、耐湿热及电绝缘性优异^[2-3]。但单一的 F51 或 BMI 树脂会因其某种性能上的不足、综合性能不理想,而在实际应用中受到限制,将两种材料复合可以得到耐高温、韧性好的高性能绝缘材料,并可以应用于常见的电机、电器以及电子封装等领域。聚醚砜(PES)是一种韧性好、模量高及耐热性优异的热塑性树脂,并与 BMI 树脂有着良好的相容性,可以大大改善材料的韧性^[4]。纳米 SiO₂ 化学性质稳定、耐热性优异、绝缘性良好,但未改性纳米 SiO₂ 在基体中分散性差,需对其表面修饰以提高在聚合物基体中的分散性和界面作用^[5]。国内外对于 BMI 树脂介电性能的研究大多集中在材料的介电常数与介电损耗方面。Dang 等^[6]的研究结果表明 NH₂-HBPSi/DABA/BMI 改性树脂的介电常数随端胺基超支化苯基聚硅氧烷用量的增加先增加后降低,但均高于 DABA/BMI 树脂体系,介电损耗则呈下降趋势。Wu 等^[7]在 BMI/CE 共聚物中添加有机化蒙脱土,添加量为 5% 时,复合材料的介电常数和介电损耗分别为 3.45 和 0.0088。Wang 等^[8]采用双烯丙基苯并噁嗪改性 BMI/BADCy 树脂体系,材料的介电常数和介电损耗在 10⁶ Hz 下的最小值分别为 3.17 和 0.083。大部分的研究报道对 BMI 的改性方法比较单一,并且缺少对材料击穿强度与体积电阻率的深入研究。

本研究以 BMI-F51 为树脂基体,4,4'-二氨基二苯甲烷(DDM)为固化剂,掺杂 4% (质量分数,下同)的 PES 和不同含量改性纳米 SiO₂ (KH-SiO₂) 制备多相复合材料。根据本课题组近几年的相关研究结果^[9],PES 的掺杂虽然可以改善材料的力学性能,但掺杂量过高会使材料的绝缘性能下降,因此在该研究中 PES 掺杂量为 4%;同时对纳米 SiO₂ 表面修饰效果进行分析并研究 KH-SiO₂ 掺杂量对复合材料介电常数、介电损耗、体积电阻率及击穿强度的影响,同时从理论上进行了深入分析,为复合材料在电气绝缘领域的应用提供理论和实验依据。

1 实验材料与方法

1.1 实验原料

4,4'-二氨基二苯甲烷型双马来酰亚胺(BMI),工业纯,山东省莱玉化工有限公司;酚醛环氧树脂(F-51),工业品,环氧值 0.51,无锡钱广化工原料有限公司;聚醚砜(PES),分子量 40000,长春吉大特塑工程有限公司;纳米二氧化硅(nano-SiO₂),粒径

30nm,杭州万景新材料有限公司;3-缩水甘油醚氧基丙基三甲氧基硅烷(KH-560),分子量 236.34,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;4,4'-二氨基二苯甲烷(DDM),化学纯,分子量 198.27,上海麦克林生化科技有限公司。

1.2 Nano-SiO₂ 的表面修饰

将纳米 SiO₂ 粉末置于真空干燥箱中,在 100℃ 下干燥 24h,取一定量干燥的纳米 SiO₂ 粉末于烧杯中,加入 50mL 无水乙醇,搅拌混合均匀转移至三口烧瓶中,在超声 80℃ 下搅拌 10min,缓慢加入一定量配制好的 KH-560 水溶液,超声搅拌 6h 得到悬浮乳液,待冷却至室温将乳液离心分离,将产物在烘箱中 90℃ 下烘干 24h,研磨筛选,即得到 KH-SiO₂。

1.3 复合材料的制备

将 24g F51 加入三口瓶中,随后向三口瓶中加入一定量 KH-SiO₂,80℃ 超声搅拌 2h。将三口瓶转移至恒温加热套,加热至 160℃,缓慢加入 1.47g PES 树脂,搅拌至完全溶解,温度降至 130℃,加入 5.3g BMI,搅拌约 30min,溶液变为酒红色,缓慢加入 6g DDM 并匀速搅拌,抽真空至气泡完全消失,制得混合胶液。将胶液转移至预热的模具中,并进行梯度升温固化,固化工艺为:120℃/1h→150℃/1h→180℃/1h→200℃/2h→230℃/1h。脱模,制得 KH-SiO₂/PES/BMI-F51 复合材料,编号见表 1。

表 1 样品编号与组分

Table 1 Number and component of samples

Number	Component	Mass fraction/%	
		KH-SiO ₂	PES
A	BMI-F51	0	0
B	PES/BMI-F51	0	4
C1	KH-SiO ₂ /PES/BMI-F51	0.5	4
C2	KH-SiO ₂ /PES/BMI-F51	1.0	4
C3	KH-SiO ₂ /PES/BMI-F51	1.5	4
C4	KH-SiO ₂ /PES/BMI-F51	2.0	4
C5	KH-SiO ₂ /PES/BMI-F51	2.5	4

1.4 材料结构表征及性能测试

采用 EQUINOX-55 型傅里叶变换红外光谱测定物质的吸收峰,分析基团是否存在,测试前将样品烘干并制成溴化钾压片,测试范围 400~4000cm⁻¹;采用 XL-30TMP 扫描电子显微镜观察材料微观形貌,分析无机组分的改性效果及多相复合材料的相结构状态,测试前将样品做喷金处理;采用 JEM-2100 透射电子显微镜观察无机组分在超微结构下的微结构、改性效果及粒子尺寸;利用 ZC-36 高阻计并按照 GB/T 1410—2006 标准测试复合材料的体积电阻,通过电极面积与

试样厚度计算体积电阻率;利用 Agilent 4294A 介电分析仪表征材料的介电性能(介电损耗和介电常数),测试温度室温,测试频率 10~10⁷ Hz,样品为复合材料浇铸胶盘,直径 $d=25\text{mm}$,在样品双面蒸镀上直径为 25mm 的同心圆形导电银,并在 80℃ 下短路处理 5h 消除水分及残余电荷,按照 GB/T 1409—2006 标准分别测量介电常数和介电损耗随频率变化情况;利用 SDJ-50kV 电压击穿试验仪并按照 GB/T 1408.1—2006 标准测试复合材料击穿强度,评价材料的耐压程度,升压速率为 0.5kV/s。

2 结果与分析

2.1 SiO₂ 的表面修饰效果分析

2.1.1 修饰机理

KH-SiO₂ 的结构模拟如图 1 所示。在水的作用下,偶联剂上的一OCH₃ 水解生成羟基,形成了 Si—OH,此 Si—OH 可以与纳米 SiO₂ 表面的 Si—OH 通过缩水反应形成 Si—O—Si,并且在偶联剂分子间也会脱水缩合生成不规则多分子层^[10]。偶联剂上的环氧基团可以与树脂基体形成“分子桥”,提高纳米 SiO₂ 与树脂基体间的相互作用,降低 SiO₂ 自身分子间的作

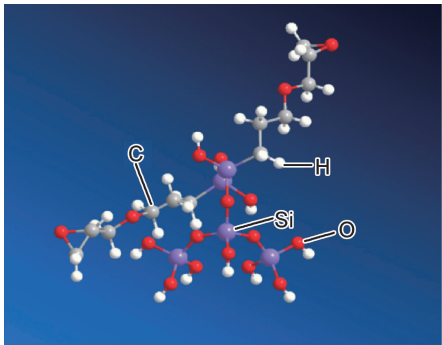


图 1 KH-SiO₂ 的结构模拟图

Fig. 1 Structure simulation diagram of KH-SiO₂

用,从而提高在树脂基体中的分散性并形成稳定的两相界面。

2.1.2 红外光谱分析

纳米 SiO₂ 和 KH-SiO₂ 的红外光谱如图 2 所示。从图 2 中可以看出,在 1082,809,472cm⁻¹ 处都存在相同的特征吸收峰,其中 809,472cm⁻¹ 处为 Si—O 的对称伸缩峰和弯曲振动峰,1082cm⁻¹ 处强而宽的吸收峰则是由 Si—O—Si 的反对称伸缩振动引起的。1630cm⁻¹ 出现的峰与 3423cm⁻¹ 处的宽峰分别为纳米 SiO₂ 结构水中 O—H 的弯曲振动与伸缩振动峰。KH-SiO₂ 在 1138,2975,2927cm⁻¹ 处出现了新的吸收峰,其中 2975,2927cm⁻¹ 分别为—CH₃ 和—CH₂ 的不对称伸缩振动峰,而在 1138cm⁻¹ 处的峰则为 C—O—C 的吸收峰^[11],由此看出,偶联剂 KH-560 已经接枝到纳米 SiO₂ 的表面并得到 KH-SiO₂,达到了改性的目的。

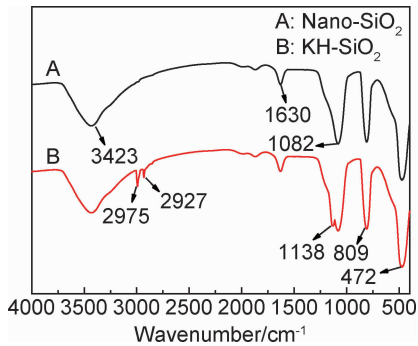


图 2 Nano-SiO₂ 和 KH-SiO₂ 的红外光谱

Fig. 2 Infrared spectra of nano-SiO₂ and KH-SiO₂

2.2 微观形貌分析

2.2.1 纳米 SiO₂ 和 KH-SiO₂

纳米 SiO₂ 和 KH-SiO₂ 的 SEM 照片如图 3 所示。从图 3 中看到,改性前后的 SiO₂ 粒径均为纳米级,改性前 SiO₂ 粒子团聚现象严重,形成了不规则的团簇

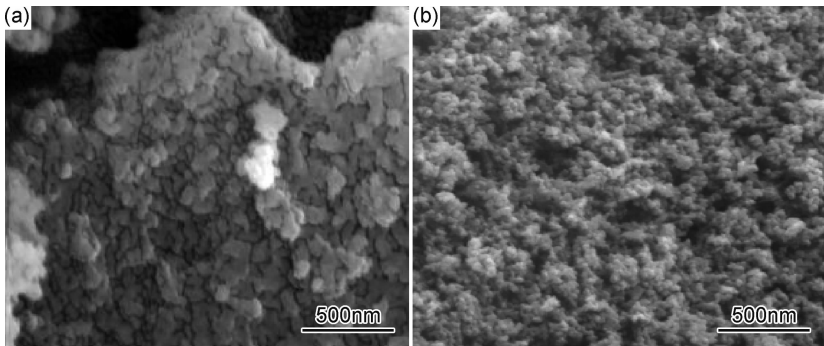


图 3 Nano-SiO₂ 和 KH-SiO₂ 的 SEM 图 (a)nano-SiO₂; (b)KH-SiO₂

Fig. 3 SEM images of nano-SiO₂ and KH-SiO₂ (a)nano-SiO₂; (b)KH-SiO₂

状,说明分子间作用力较强;而 KH-SiO₂ 的粒子松散,没有明显的团簇状,纳米粒子团聚倾向减弱,粒径减小,比表面积增大。这是由于未改性的纳米 SiO₂ 粒子表面富含大量的羟基,在氢键的作用下,使得粒子间形成了二次团聚;而经过硅烷偶联剂 KH-560 修饰的 KH-SiO₂ 粒子,其表面大部分羟基与偶联剂中的活性基团形成了稳定的作用,减弱了 SiO₂ 粒子自身分子间的相互作用,粒子更松散,这种现象有利于增强纳米

SiO₂ 粒子与树脂基体的相互作用^[12],两相间的作用力更强会赋予复合材料优异的性能。

图 4 为 KH-SiO₂ 的 TEM 照片。从图 4 中观察到,纳米 SiO₂ 呈现出四面体晶形结构,大部分呈一次结构的单分散状态,没有明显的二次团聚现象,整体结构松散,同时在粒子边缘处引入了新的结构,即偶联剂分子,说明在纳米 SiO₂ 表面接枝了有机基团,达到了改性的目的。这一结论与前述分析是一致的。

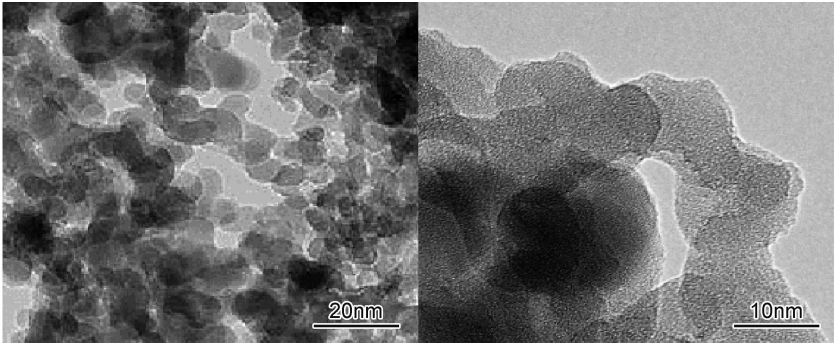


图 4 KH-SiO₂ 的 TEM 图
Fig. 4 TEM image of KH-SiO₂

2.2.2 复合材料

图 5 是样品的 SEM 断面形貌图。从图 5(a)可以看到,样品 A 的断面形貌呈现典型的脆性断裂特征,发展过程中未遇到阻碍,断裂纹表面光滑、平直,发展方向规则一致。从图 5(b)可以看到,样品 B 的断面开始有小裂纹产生,断裂纹更加发散、无序且变短,原因

是:PES 作为分散相,树脂基体作为连续相,PES 以微纳米形式分散在基体中,并与基体间存在较强的界面作用,界面不清晰,当材料受到外界应力作用时遇到 PES 相使断裂纹方向发生改变同时吸收大量的断裂能,提高材料的性能。从图 5(c),(d)可以看到,样品 C3 的断面呈现多相结构并生成了大量微裂纹,与样品

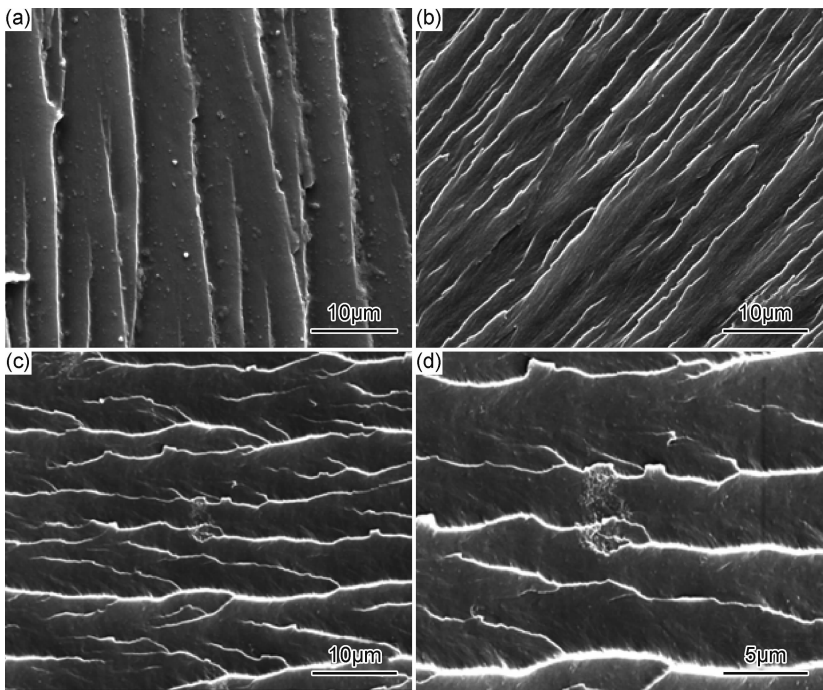


图 5 复合材料的 SEM 图 (a)样品 A;(b)样品 B;(c),(d)样品 C3
Fig. 5 SEM images of composites (a)sample A;(b)sample B;(c),(d)sample C3

B 相比 PES 与基体之间的界面变得更加模糊、PES 粒子尺寸变小、相容性提高,形成了较稳定的界面。另外,纳米 SiO₂ 经过偶联剂改性后,降低了自身的表面能,分散性较好,且 KH-SiO₂ 在材料中的粒子尺寸为纳米级,PES 和 KH-SiO₂ 与基体间的渗透作用更强,该结构将有利于提高材料的韧性与介电性能^[13]。

2.3 复合材料性能分析

2.3.1 介电常数

图 6 是 KH-SiO₂/PES/BMI-F51 复合材料介电常数(ϵ)随频率变化曲线。从图 6 中看出,样品在低频时的介电常数初始值保持在 4.42~4.82 之间,当频率小于 1×10^4 Hz 时,介电常数变化幅度很小;频率增加介电常数的下降幅度也随之变大。这是由于当材料在外电场作用时,较低频率下偶极子的转向极化能跟得上电场的变化;而当频率高于 1×10^4 Hz 时,在介质的内黏滞作用下,偶极子转向受到一定阻碍,落后于电场的变化,介电常数随着取向极化程度的减弱而降低^[14]。

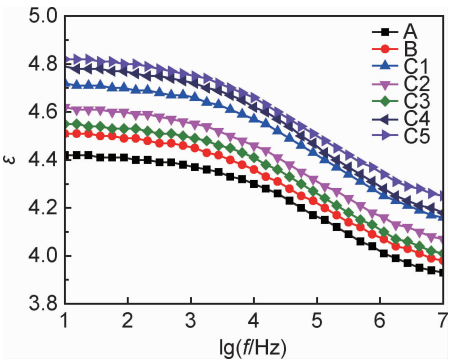


图 6 复合材料的介电常数
Fig. 6 Dielectric constant of composites

在材料中掺杂 4% PES 后介电常数出现了一定程度的上升,由于 PES 树脂中存在极性基团,体系中极性基团密度因 PES 树脂的添加而增大,取向极化程度提高;另外,PES 会与树脂基体间形成大量的界面并引发界面极化,因此材料的介电常数有所增加。当掺杂 KH-SiO₂ 后,介电常数随着 KH-SiO₂ 添加量的增加先下降再升高,当掺杂量为 1.5% 时,介电常数最小,但各组分样品的介电常数均高于样品 B。这是由于纳米 SiO₂ 固有的介电常数相对较高,而使掺杂 KH-SiO₂ 后介电常数有一定幅度的升高。聚合物的链段运动因束缚缠结效应而受到阻碍,随着 KH-SiO₂ 掺杂量的增加,束缚密度增大,树脂体系中偶极子的取向极化受到抑制,导致介电常数减小^[15]。当 KH-SiO₂ 超过一定量时,纳米 SiO₂ 与树脂基体间的界面增多,界面重叠区域的载流子受到的束缚作用减弱,载流子的迁移变得容易。另外,粒子间的作用增强而产生团

聚现象,与基体间的相容性减弱,并在材料内部引起缺陷,导致界面极化增强,介电常数也随之上升^[16]。

2.3.2 介电损耗

图 7 是复合材料介电损耗随频率变化曲线。由图 7 看出,复合材料在低频时的介电损耗角正切值($\tan\delta$)保持在 0.0019~0.0035 间,且在低频时变化幅度很小,当频率增大, $\tan\delta$ 快速上升后又趋于平缓。掺杂 PES(样品 B),介电损耗出现了明显的上升,由于 PES 树脂带有极性基团,在外电场的作用下会产生松弛损耗;同时 PES 树脂与基体间相互作用,使材料内的偶极子转向受到一定的阻碍,需要消耗更多的能量,介电损耗也因此增加^[17]。掺杂 KH-SiO₂ 后,材料的介电损耗几乎没有明显的变化,虽然纳米粒子与树脂基体间形成了界面,但多相结构材料界面稳定,在外加电场作用下界面之间并不会产生相对运动,界面极化对材料的介电损耗无贡献,因此掺杂 KH-SiO₂ 对材料的介电损耗没有太大影响。

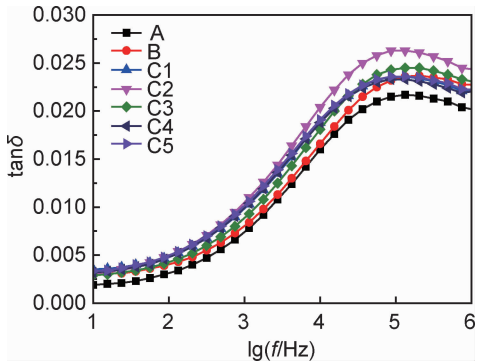


图 7 复合材料的介电损耗角正切
Fig. 7 Dielectric loss of composites

2.3.3 体积电阻率和击穿强度

材料的体积电阻率和击穿强度如图 8 所示。样品 A 和 B 的体积电阻率分别为 $1.03 \times 10^{14} \Omega \cdot m$ 和 $2.56 \times 10^{13} \Omega \cdot m$,击穿强度分别为 21.42kV/mm 和 16.63kV/mm,样品 B 较样品 A 分别降低约 75% 和 22.3%。产生这种现象的原因一方面是由于热塑性树脂 PES 自身带有一定的极性基团并与基体形成大量的界面,在外电场作用下,同时存在着电子位移极化、离子位移极化、转向极化和界面极化,这些极化现象会使载流子迁移速率加快,在一定程度上降低了材料的体积电阻率和击穿强度,因此 PES 树脂会使材料的体积电阻率和击穿强度有所下降^[18-19]。掺杂 KH-SiO₂ 后,随着掺杂量的增加,材料的体积电阻率先升高后降低,当 KH-SiO₂ 质量分数为 1.5% 时(样品 C3),体积电阻率和击穿强度达最大值分别为 $1.74 \times 10^{14} \Omega \cdot m$ 和 29.11kV/mm,比样品 A 提高 68.9% 和 35.9%。

产生这一现象的原因是:适量的 KH-SiO₂ 在基体中分散均匀,其表面经过修饰接枝了有机基团,分散相与连续相通过有机基团的桥接作用使界面更稳定,限制了分子链段的运动,并在界面处引入了深陷阱,向介质内部渗透的载流子被深陷阱捕获,被捕获的载流子很难脱陷,有效抑制了空间电荷的积累,载流子的迁移率也随之下降,使材料的体积电阻率和击穿强度有所升高。当 KH-SiO₂ 含量过高时,自身分子间作用增强,纳米粒子的分散性降低、团聚倾向加剧、粒子尺寸增大、比表面积减小,与基体间的界面重叠区域变大,形成更多的浅陷阱,对载流子的捕获能力减弱,载流子的迁移率上升,这些因素导致材料的体积电阻率和击穿强度下降^[20-21],这一点符合前述的理论分析。总之,掺杂适量的纳米粒子才会赋予材料更优异的性能。该材料的介电性能达到并超过了绝缘材料的相关标准(GB/T 1303.4—2009,介电常数小于 5.5,介电损耗小于 0.04,击穿强度大于 15.2kV/mm),可作为常规的绝缘材料使用。

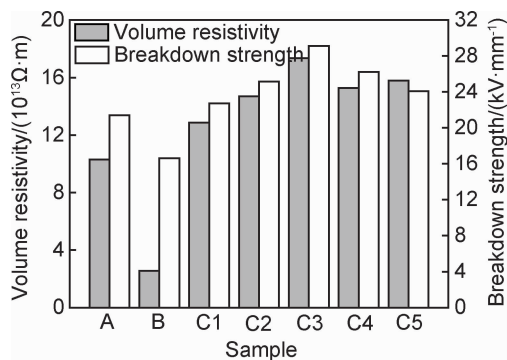


图8 样品的体积电阻率和击穿强度

Fig. 8 Volume resistivity and breakdown strength of the samples

3 结论

(1)经过偶联剂 KH-560 修饰的纳米 SiO₂ (KH-SiO₂),其表面链接了偶联剂分子,有效降低纳米粒子的自团聚倾向,提高其在基体中的分散性和相容性。

(2)热塑性树脂 PES 对材料的力学性能贡献很大,由脆性断裂转变为韧性断裂,但对材料的介电性能不利;掺杂 KH-SiO₂ 改善了复合材料的介电性能,弥补了 PES 的负面影响。

(3)当 KH-SiO₂ 含量为 1.5%时,KH-SiO₂/PES/BMI-F51 复合材料的体积电阻率和击穿强度分别为 $1.74 \times 10^{14} \Omega \cdot m$ 和 29.11kV/mm,比树脂基体 ($1.03 \times 10^{14} \Omega \cdot m$ 和 21.42kV/mm)提高了 68.9%和 35.9%,介电性能满足绝缘材料的使用要求。

参考文献

- [1] 赵蕾,李林洪,李巧玲. 酚醛环氧树脂的改性研究进展[J]. 应用化工,2016,45(10):1950-1953.
ZHAO L, LI L H, LI Q L. Progress in modification of novolac epoxy resin[J]. Applied Chemical Industry, 2016, 45(10): 1950-1953.
- [2] LEE D H, SUN K C, QADIR M B, et al. Optimized performance of quasi-solid-state DSSC with PEO-bismaleimide polymer blend electrolytes filled with a novel procedure[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2014, 14(12): 9377-9382.
- [3] ZHANG L Y, CHEN P, GAO M B, et al. Synthesis, characterization, and curing kinetics of novel bismaleimide monomers containing fluorene cardo group and aryl ether linkage[J]. Designed Monomers and Polymers, 2014, 17(7): 637-646.
- [4] JAFARINASAB M, BARZIN J, MORTAHEB H R, et al. Structure and performance characterization of PDMS/PES-based pervaporation membranes for ethanol/water separation [J]. Iranian Polymer Journal, 2015, 24(12): 989-1002.
- [5] CHEN D Z, CHEN F X, ZHANG H W, et al. Preparation and characterization of novel addition cured polydimethylsiloxane nanocomposites using nano-silica sol as reinforcing filler[J]. Polymer International, 2015, 64(12): 1741-1746.
- [6] DANG J, WANG R M, LOU R X, et al. Mechanical, thermal and dielectric properties of BDM/DBA/HBPSi composites[J]. Polymer Bulletin, 2014, 71(4): 787-794.
- [7] WU G L, CHENG Y H, WANG K K, et al. Fabrication and characterization of OMMt/BMI/CE composites with low dielectric properties and high thermal stability for electronic packaging[J]. Journal of Materials Science-Materials in Electronics, 2016, 27(6): 5592-5599.
- [8] WANG Y Q, KOU K C, ZHAO W, et al. The effect of functionalized benzoxazine with allyl groups on the dielectric, mechanical and thermal properties of BMI/BADCy composites [J]. RSC Advances, 2015, 5(120): 99313-99321.
- [9] 陈宇飞,代起望,滕成君,等. 超临界氧化铝/聚醚砜-BMI-BBA-BBE 复合材料的微观结构与耐热性[J]. 复合材料学报, 2015, 32(3): 665-672.
CHEN Y F, DAI Q W, TENG C J, et al. Microstructure and heat-resistance of SCE-Al₂O₃/PES-BMI-BBA-BBE composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(3): 665-672.
- [10] 陈凯玲,赵蕴慧,袁晓燕. 二氧化硅粒子的表面化学修饰-方法、原理及应用[J]. 化学进展, 2013, 25(1): 95-104.
CHEN K L, ZHAO Y H, YUAN X Y. Chemical modification of silica: method, mechanism and application[J]. Progress in Chemistry, 2013, 25(1): 95-104.
- [11] 周鑫,杨飞,李传宪,等. 无机纳米 SiO₂ 的表面改性研究[J]. 化工新型材料, 2015, 43(2): 167-170.
ZHOU X, YANG F, LI C X, et al. Study on surface modification of inorganic nano-SiO₂ particles[J]. New Chemical Materials, 2015, 43(2): 167-170.
- [12] 姚培,李树白,刘媛,等. 改性纳米二氧化硅的制备及其对亚甲基蓝的吸附性能[J]. 化学研究与应用, 2018, 30(2): 297-302.

- YAO P, LI S B, LIU Y, et al. Preparation of modified nano silica and its adsorption performances for methylene blue[J]. Chemical Research and Application, 2018, 30(2): 297-302.
- [13] 曾少华, 申明霞, 段鹏鹏, 等. 碳纳米管-玻璃纤维织物增强环氧复合材料的结构与性能[J]. 材料工程, 2017, 45(9): 38-44.
- ZENG S H, SHEN M X, DUAN P P, et al. Structure and property of carbon nanotubes attached glass fabric reinforced epoxy composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(9): 38-44.
- [14] 张明艳, 隋珊, 陈金玉, 等. 功能化碳纳米管/环氧树脂复合材料性能研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 97-102.
- ZHANG M Y, SUI S, CHEN J Y, et al. Study of properties of functional multi-walled carbon nanotubes/epoxy nanocomposites[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 97-102.
- [15] GUO Y, CHEN F H, HAN Y, et al. High performance fluorinated bismaleimide-triazine resin with excellent dielectric properties[J]. Journal of Polymer Research, 2018, 25(2): 27.
- [16] JIANG M L, ZOU X Q, HUANG Y M, et al. The effect of bismaleimide on thermal, mechanical, and dielectric properties of allyl-functional bisphthalonitrile/bismaleimide system[J]. High Perform Polymers, 2017, 29(9): 1016-1026.
- [17] ZHANG Z Y, YUAN L, LIANG G Z, et al. Fabrication and origin of flame retarding glass fiber/bismaleimide resin composites with high thermal stability, good mechanical properties, and a low dielectric constant and loss for high frequency copper clad laminates[J]. RSC Advances, 2016, 6(24): 19638-19646.
- [18] QIU J, WU Q Q, JIN L. Effect of hyperbranched polyethyleneimine grafting functionalization of carbon nanotubes on mechanical, thermal stability and electrical properties of carbon nanotubes/bismaleimide composites[J]. RSC Advances, 2016, 6(98): 96245-96249.
- [19] WANG X, JIANG Q, XU W Z, et al. Effect of carbon nanotube length on thermal, electrical and mechanical properties of CNT/bismaleimide composites[J]. Carbon, 2013, 53: 145-152.
- [20] 刘晨阳, 郑晓泉, 别成亮, 等. 掺杂 ZnO/环氧树脂基体的制备及其非线性电导改性研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(12): 24-30.
- LIU C Y, ZHENG X Q, BIE C L, et al. Research of preparation and non-linear conductivity modification of doped ZnO/epoxide resin material [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(12): 24-30.
- [21] 王旗, 李喆, 尹毅, 等. 微、纳米无机颗粒/环氧树脂复合材料击穿强度性能[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 230-235.
- WANG Q, LI Z, YIN Y, et al. The effect of micro and nano inorganic filler on the breakdown strength of epoxy resin[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 230-235.
-
- 基金项目:** 哈尔滨创新人才专项(2015RAXXJ029)
- 收稿日期:** 2018-08-28; **修订日期:** 2018-12-30
- 通讯作者:** 陈宇飞(1963—), 女, 教授, 博士, 主要从事聚合物基复合材料相关研究, 联系地址: 黑龙江省哈尔滨市香坊区林园路4号哈尔滨理工大学材料科学与工程学院(150040), E-mail: chenyufei@hrbust.edu.cn.
- (本文责编: 解 宏)