

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.11.023

PVDF/NLCTO 陶瓷粉复合材料的制备及介电性能

刘圣楠,蔡会武,彭建东,王行行,周文英

(西安科技大学化学与化工学院,西安 710054)

摘要:以聚偏氟乙烯(PVDF)为基体, $\text{Na}_{0.5}\text{La}_{0.5}\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (NLCTO) 陶瓷粉为填料,采用溶液混合法制备 PVDF/NLCTO 陶瓷粉复合材料。首先探讨 NLCTO 陶瓷粉煅烧温度对复合材料介电常数、介电损耗的影响;其次对 NLCTO 陶瓷粉进行表面改性制得 Cu 包覆 NLCTO 陶瓷粉(Cu@NLCTO),研究了铜的包覆改性对复合材料介电性能的影响。结果表明, NLCTO 陶瓷粉煅烧温度对复合材料介电性能影响较大。900℃的 NLCTO 陶瓷粉质量分数为 60% 时, PVDF/NLCTO 陶瓷粉复合材料获得了高的介电常数和低的介电损耗。铜的包覆量为 NLCTO 陶瓷粉质量的 50% 时, PVDF/ Cu@NLCTO 陶瓷粉复合材料可以获得更优的介电性能和力学性能。

关键词: 复合材料; 介电性能; NLCTO 陶瓷粉; 煅烧温度

中图分类号: TQ325.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)11-0109-06

Preparation and Dielectric Properties of PVDF/NLCTO Ceramic Powder Composites

Liu Shengnan, Cai Huiwu, Peng Jiandong, Wang Hanghang, Zhou Wenying

(College of Chemistry & Chemical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract : The PVDF/NLCTO ceramic powder composites were prepared by solution mixing method using polyvinylidene fluoride (PVDF) as the matrix and $\text{Na}_{0.5}\text{La}_{0.5}\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (NLCTO) as the filler. Firstly, the influence of NLCTO ceramic powder calcining temperature on the dielectric constant and dielectric loss of the composites was explored. Then, the effect of copper coating on the dielectric properties of the composites was discussed. The results show that the calcining temperature of NLCTO ceramic powder has a great influence on the dielectric properties of the composites. When the NLCTO ceramic powder content is 60wt%, the composite has high dielectric constant and low dielectric loss. When the amount of copper coated is 50% of NLCTO ceramic powder mass, PVDF/ Cu@NLCTO ceramic powder composite material can obtain better dielectric properties and mechanical properties.

Keywords : composite materials ; dielectric property ; NLCTO ceramic powder ; calcining temperature

在微电子领域,伴随着信息技术的飞速发展,电子器件逐渐向系统化、小型化的方向发展^[1-2]。因此,采用嵌入式无源器件取代分立式无源器件来减小集成电路板面积。无源器件占电子总器件的 70%,而无源器件中电容器占到一半以上^[3]。电容器高电容量的获得主要通过三种方式:减小板间距、增加极板面积、提高电介质材料的介电常数。适度减小板间距可以提高电容器电容,但是纳米级已达工艺的极限。当电容器板间距达到纳米级时,介质层将由绝缘态变成半导态,致使漏导电流增加材料不能使用^[4]。增加极板面积来提高电容器电容值的制作工

艺比较复杂,难以确保电容器性能的稳定性,并且与电容器小型化的趋势相背离。因此,提高电介质材料的介电常数是改善电容器电容值最有前景的方法。

传统电介质材料主要包含两类,一类是高介电陶瓷,一类是高介电聚合物。陶瓷 BaTiO_3 , $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$, $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ 等虽具有高的介电常数但其柔性差、能耗高、加工复杂等缺点限制了其广泛应用^[5-7]。高介电聚合物如聚酰亚胺、环氧树脂、聚苯乙烯、聚偏氟乙烯(PVDF)等虽具有良好的柔韧性、易加工性和大面积成膜等特性,但其介电常数普遍较

基金项目: 国家自然科学基金项目(51577154)

通讯作者: 蔡会武,教授,主要研究方向高导热聚合物 E-mail : caihuiwu@126.com

收稿日期: 2018-09-07

引用格式: 刘圣楠,蔡会武,彭建东,等. PVDF/NLCTO 复合材料的制备及介电性能[J]. 工程塑料应用,2018,46(11): 109-114.

Liu Shengnan, Cai Huiwu, Peng Jiandong, et al. Preparation and dielectric properties of PVDF/NLCTO composites[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(11): 109-114.

低(介电常数小于10)限制了其实际应用^[8-10]。因此,将陶瓷与聚合物复合制备兼顾陶瓷与聚合物双重特性的复合材料成为了研究的热点^[11]。研究表明,聚合物/陶瓷复合材料只有在高填充量的条件下才能够获得高的介电常数,这将会降低复合材料的加工性能。主要目标是制备具有良好加工性能和介电性能的聚合物/陶瓷复合材料。

笔者选取高介电 $\text{Na}_{0.5}\text{La}_{0.5}\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (NLCTO) 为填料,柔性聚偏氟乙烯(PVDF)PVDF为基体,制备出PVDF/NLCTO陶瓷粉复合材料。研究了NLCTO陶瓷粉煅烧温度对PVDF/NLCTO陶瓷粉复合材料介电性能的影响。选出最佳煅烧温度条件下的NLCTO陶瓷粉,并对其进行铜包覆改性。将改性过后的Cu@NLCTO陶瓷粉与PVDF复合,制备出具有高介电性能和良好加工性能的PVDF/Cu@NLCTO陶瓷粉复合材料。

1 实验部分

1.1 主要原材料

硝酸钠:广东光华科技股份有限公司;

硝酸铜:天津市福晨化学试剂厂;

硝酸镧:上海山浦化工有限公司;

钛酸丁酯:天津市科密欧化学试剂有限公司;

PVDF:苏威(上海)有限公司;

二甲基甲酰胺:广东光华科技股份有限公司。

1.2 主要仪器与设备

电子天平:JM2012型,余姚纪铭称重检验设备有限公司;

电热鼓风干燥箱:101-OESB型,上海科恒实业发展有限公司;

恒温油浴锅:DF-101S型,金坛市水北康辉实验仪器厂;

超声仪:KQ-50E型,昆山市超声仪器有限公司;

多头磁力搅拌机:HJ-6型,江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司;

热压机:R-3201型,武汉启恩科技发展有限公司;

电炉:1 kW,北京科伟永兴仪器有限公司;

马弗炉: SX-4-10型,北京科伟永兴仪器有限公司;

X射线衍射(XRD)仪: D8 Advance型,德国布鲁克公司;

激光粒度分析仪:LS-230型,麦克莫瑞提克仪

器有限公司;

透射电子显微镜(TEM): Hitachi-8000I型,日本JEOL株式会社;

阻抗分析仪: Agilent 4294A型,美国安捷伦公司。

1.3 试样制备

(1) NLCTO陶瓷粉的制备。

根据 $\text{Na}_{0.5}\text{La}_{0.5}\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ 化学式中各元素的物质的量之比,用电子天平称取不同质量的硝酸铜、硝酸钙和硝酸钠。将硝酸铜和硝酸钙分别溶解到一定量的乙醇中,硝酸钠溶解在10 mL蒸馏水中。随后将三种溶液混合磁力搅拌0.5 h后得到混合溶液,接着在此溶液中缓慢加入钛酸丁酯溶液,待出现淡蓝色凝胶时停止搅拌,静至12 h。随后将凝胶置于100℃的油浴锅中干燥18 h,得到蓝绿色干凝胶。干凝胶放置在马弗炉中,分别在800,850,900,950,1000℃条件下煅烧10 h,然后待马弗炉降至室温得到了NLCTO陶瓷粉。NLCTO陶瓷粉研磨过后采用61 μm的标准检验筛进行筛分,最终得到小于63 μm的NLCTO陶瓷粉。

(2) Cu@NLCTO陶瓷粉的制备。

笔者采用氧化还原法在NLCTO陶瓷粉表面包覆Cu,其反应原理如下:



首先将过量的水合肼与硝酸铜溶液混合,调节pH值至13,确保氢氧化铜沉淀完全溶解。再加入900℃煅烧条件下的NLCTO陶瓷粉搅拌20 min,60℃磁力搅拌反应1 h,反应的过程中加入适量氢氧化钠溶液确保pH值保持在13左右。反应结束后抽滤并用蒸馏水洗涤数次,最后,将所得产物放在80℃真空干燥箱中烘干,简称为Cu@NLCTO陶瓷粉。

(3) PVDF复合材料的制备。

称取一定量的PVDF加入到二甲基甲酰胺中,待其成透明溶液,添加NLCTO陶瓷粉或Cu@NLCTO陶瓷粉磁力搅拌7 h,随后在电炉上加热搅拌至胶状,最后在80℃下干燥8 h得到复合薄膜。将薄膜用剪刀剪成碎片,整齐地叠放在铜箔上,盖上铜箔和模具上下底面放在热压机上,在200℃/10 MPa条件下热压成型,得到PVDF/NLCTO陶瓷粉及PVDF/Cu@NLCTO陶瓷粉复合材料。

1.4 性能测试

XRD表征:采用XRD仪对陶瓷粉的微观结构

进行表征;

用激光粒度分析仪对陶瓷粉粒径进行检测;

采用 TEM 对改性后的陶瓷粉进行形貌观察;

介电性能用阻抗分析仪测试。检测条件为室温, $40 \sim 10^7$ Hz 频率范围。介电损耗可以通过阻抗分析仪直接测出,介电常数通过阻抗分析仪测得的电容值计算得到。

2 结果与讨论

2.1 NLCTO 陶瓷粉 XRD 分析

图 1 为不同煅烧温度下 NLCTO 陶瓷粉 XRD 衍射图。800℃煅烧条件下, NLCTO 粉出现了与钛酸铜钙相同的衍射峰,同时也出现了第二相 CuO 和 TiO₂ 衍射峰。随着煅烧温度的升高第二相物质衍射峰逐渐减弱。1000℃时,第二相物质衍射峰基本消失,近似于合成纯的 NLCTO 钙钛矿物质。

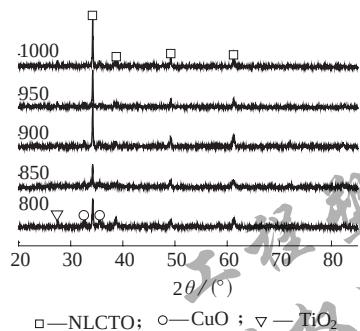
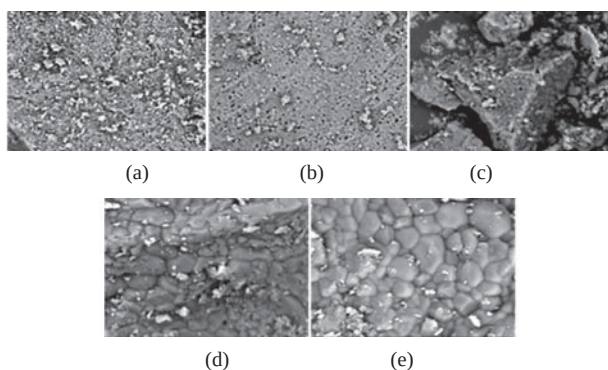


图 1 不同煅烧温度下 NLCTO 陶瓷粉 XRD 图

2.2 NLCTO 陶瓷粉晶粒分析

图 2 为不同煅烧温度下 NLCTO 陶瓷粉表面 SEM 照片。



煅烧温度: a—800℃; b—850℃; c—900℃; d—950℃; e—1000℃

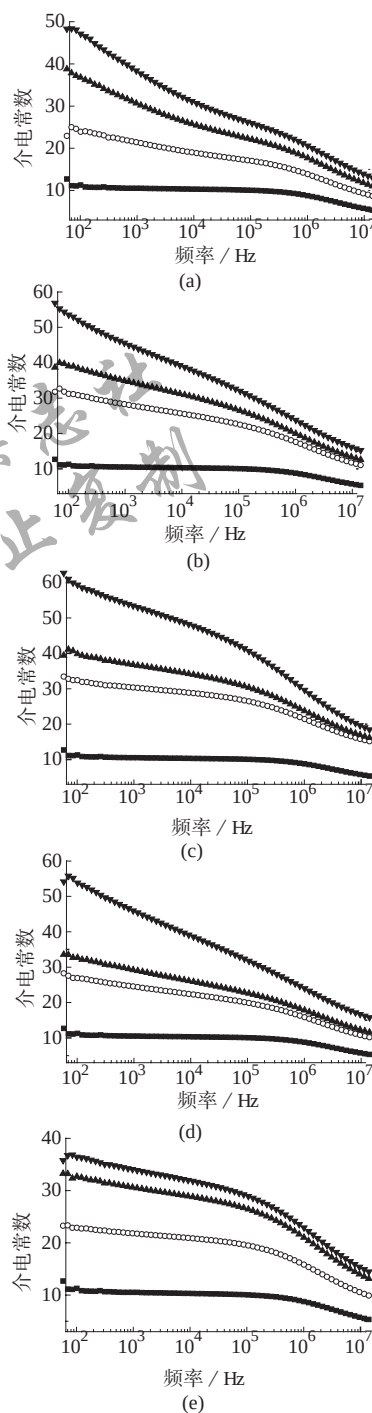
图 2 不同煅烧温度下 NLCTO 陶瓷粉表面 SEM 照片

由图 2 可知,800,850℃煅烧陶瓷粉表面出现了大量的孔洞,晶粒之间彼此粘结观察不到明显的晶界。900,950,1000℃煅烧陶瓷粉表面可以看到清晰的晶粒和晶界。900℃煅烧温度下,陶瓷粉晶粒产生了大小不均形状各异的现象。950,1000℃煅烧

条件下,形成了比较均匀的陶瓷晶粒。

2.3 PVDF/NLCTO 陶瓷粉复合材料介电性能

图 3 为不同煅烧温度下,不同 NLCTO 陶瓷粉含量的 PVDF/NLCTO 陶瓷粉复合材料介电常数。由图 3 可知, PVDF/NLCTO 陶瓷粉复合材料介电常数均随频率的增加而降低。PVDF/NLCTO 陶瓷



NLCTO 的质量分数: ■—0%; ○—40%; ▲—50%; ▼—60%
煅烧温度: a—800℃; b—850℃; c—900℃; d—950℃; e—1000℃

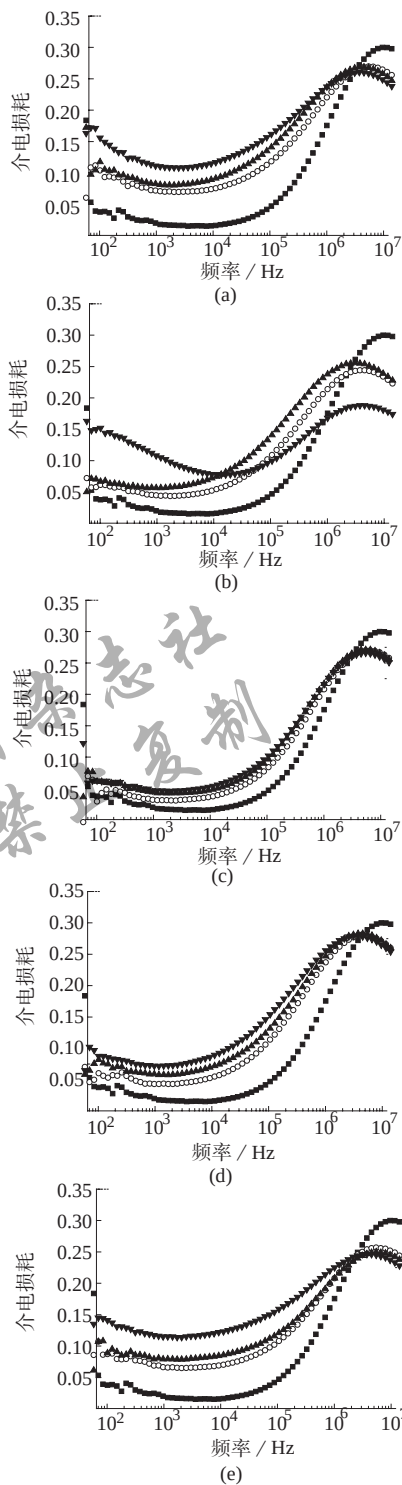
图 3 不同煅烧温度下,不同 NLCTO 陶瓷粉含量的 PVDF/NLCTO 陶瓷粉复合材料的介电常数

粉复合材料介电常数随着填料含量的增加而增加,这一现象与 Licht-enecker 对数方程结果一致^[12]。主要原因在于随着填料含量的增加,无机与有机接触面逐渐增大,提高复合材料的界面极化。对比各个煅烧温度下复合材料介电常数可以发现,随着煅烧温度的升高,复合材料介电常数出现了先增加后降低的趋势。煅烧温度为 900℃ 时, PVDF/NLCTO 陶瓷粉复合材料介电常数最大, 65 Hz 下, NLCTO 质量分数为 60% 时, PVDF/NLCTO 陶瓷粉复合材料介电常数为 61。出现这一现象可能是由陶瓷粉的粒径和自身的晶粒分布共同作用形成的^[13]。由陶瓷粒径分析可知,不同煅烧温度下陶瓷粉粒度分布不均匀,这可能影响到 PVDF/NLCTO 陶瓷粉复合材料界面的复杂性,进而对复合材料界面极化产生影响。根据内部阻挡层理论知,半导体晶粒和绝缘晶界可以组成微电容器来影响陶瓷粉的介电常数。介电常数较纯 PVDF 提高 6 倍。晶粒分析可知,不同煅烧温度下,陶瓷粉晶粒存在较大差异,因此不同煅烧温度下陶瓷粉自身介电常数存在较大差异。根据 Licht-enecker 对数方程可知,陶瓷自身介电常数也会对复合材料介电常数产生影响。

图 4 为不同煅烧温度下,不同 NLCTO 陶瓷粉含量的 PVDF/NLCTO 陶瓷粉复合材料的介电损耗。由图 4 可知, PVDF/NLCTO 陶瓷粉复合材料介电损耗均随频率的增加出现先降低后增加的趋势。在低频段,复合材料介电损耗主要取决于电导损耗,电导损耗随频率的增加而降低。高频段,复合材料介电损耗主要取决于极化损耗,极化损耗随着频率的升高而增加。低频段, PVDF/NLCTO 陶瓷粉复合材料介电损耗与填料含量呈正相关。随着陶瓷填料含量的增加,陶瓷颗粒的团聚越来越明显,增加了复合材料的不均匀性,提高了复合材料的极化损耗和电导损耗^[14]。低频段,复合材料介电损耗随着煅烧温度的升高出现先降低后增加的趋势。65 Hz 下, NLCTO 陶瓷粉质量分数为 60%, NLCTO 煅烧温度为 900℃ 时,复合材料介电损耗达到最低,介电损耗为 0.08。这可能是由陶瓷自身的损耗和陶瓷粒径分布共同作用产生的结果^[15-17]。

2.4 Cu@NLCTO 陶瓷粉 XRD 分析

进一步对 NLCTO 进行 Cu 包覆,探究其对 PVDF 复合材料介电性能的影响。图 5 为 Cu 的包覆量为 50% 的 Cu@NLCTO 陶瓷粉衍射图,与标准 Cu 的 XRD 衍射图相比,分别在 43.3°, 50.5°, 74.1°



NLCTO 的质量分数: ■—0%; ○—40%; ▲—50%; ▼—60%

a—800℃; b—850℃; c—900℃; d—950℃; e—1000℃

图 4 不同煅烧温度下,不同 NLCTO 陶瓷粉含量的 PVDF/NLCTO 陶瓷粉复合材料的介电损耗

出现了 Cu 的 (111) 晶面、(200) 晶面和 (220) 晶面,证明通过氧化还原法成功合成了铜粉。与图 1 中 900℃ 煅烧温度下 NLCTO 粉的 XRD 衍射图相比,其出现了 Cu 和 Cu₂O 的衍射峰,证明在铜的干燥过

程中有少量的铜被氧化成 Cu_2O 。

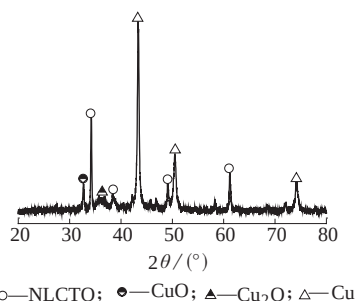


图5 Cu包覆量为50%的Cu@NLCTO陶瓷粉XRD衍射图

2.5 Cu@NLCTO 陶瓷粉的 TEM 分析

图6为Cu@NLCTO陶瓷粉的TEM透射图。从图中可以清晰地观察到明暗不同的层状结构。结合Cu@NLCTO陶瓷粉衍射图结果可以证明成功地在NLCTO表面包覆了一层Cu壳。

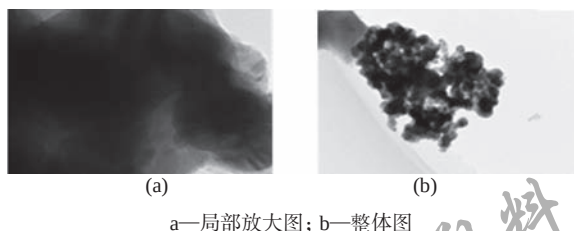


图6 质量分数为50%的Cu@NLCTO陶瓷粉TEM照片

2.6 PVDF/Cu@NLCTO 陶瓷粉复合材料介电性能

图7为不同Cu@NLCTO陶瓷粉含量下,PVDF/Cu@NLCTO陶瓷粉复合材料介电常数以及介电损耗。由图7a可知,PVDF/Cu@NLCTO陶瓷粉复合材料在低含量下可获得高介电常数。65 Hz条件下,Cu@NLCTO陶瓷粉质量分数为25%时,该复合材料介电常数为55,与NLCTO陶瓷粉质量分数为60%的PVDF/NLCTO陶瓷粉复合材料的介电常数大致相当,且表现出更好的频率稳定性。Cu的加入既可提高界面极化,又可改变电场分布,提高NLCTO陶瓷极化利用率^[18-21]。由图7b可知,复合材料介电损耗维持在较低范围内。因此,通过少量Cu包覆NLCTO陶瓷粉制备的PVDF/Cu@NLCTO陶瓷粉复合材料可以在低填充量下获得高的介电常数和低的介电损耗,进而可以很好地解决陶瓷高填充量下对复合材料加工性能的破坏。

3 结论

采用溶胶-凝胶法制备NLCTO陶瓷粉,随后采用氧化还原沉淀法制备了Cu@NLCTO核壳结构粉。最终采用溶液混合法制备了PVDF/NLCTO陶瓷粉复合材料和PVDF/Cu@NLCTO陶瓷粉复

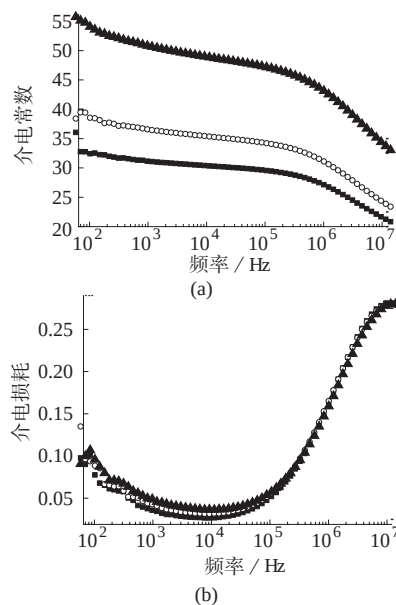


图7 不同Cu@NLCTO陶瓷粉含量下,PVDF/Cu@NLCTO陶瓷粉复合材料介电常数以及介电损耗

合材料。主要研究了复合材料的介电性能。

(1)通过阻抗分析仪对PVDF/NLCTO陶瓷粉复合材料介电性能检测可知,PVDF/NLCTO陶瓷粉复合材料介电常数与陶瓷含量呈正相关。随着NLCTO粉煅烧温度的升高,PVDF/NLCTO陶瓷粉复合材料的介电常数先增加后降低。在低频段,PVDF/NLCTO陶瓷粉复合材料介电损耗随着NLCTO陶瓷粉煅烧温度的增加出现先降低后增加的趋势。室温65 Hz下,900℃煅烧温度下的NLCTO陶瓷粉质量分数为60%时,PVDF/NLCTO陶瓷粉复合材料介电性能达到最佳,较纯PVDF介电常数提高6倍,介电损耗为0.08。

(2)900℃煅烧温度下的NLCTO陶瓷粉表面包覆了一层铜壳。铜的加入既可以提高界面极化又可以均化电场分布,提高陶瓷极化的利用率。铜的包覆量为陶瓷质量的50%时,PVDF/Cu@NLCTO陶瓷粉复合材料可以在低含量下获得高的介电常数和低的介电损耗。65 Hz下,Cu@NLCTO陶瓷粉的质量分数为25%时,PVDF/Cu@NLCTO陶瓷粉复合材料的介电常数和介电损耗分别为55和0.1,最终获得了具有良好介电性能和加工性能的PVDF/Cu@NLCTO陶瓷粉复合材料。

参考文献

- [1] Zhang Changhai, Chi Qingguo, Liu Lizhu, et al. Nano-

- Fe₃O₄ deposited CaCu₃Ti₄O₁₂ / poly(vinylidene fluoride) composites with enhanced dielectric properties[J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2017, 28(3):2 501–2 510.
- [2] Wang Zhuo, Fang Mingrui, Li Haijuan, et al. Enhanced dielectric properties in poly(vinylidene fluoride) composites by nanosized Ba(Fe_{0.5}Nb_{0.5})O₃ powders[J]. Composites Science & Technology, 2015, 117:410–416.
- [3] 王芳芳. CCTO/PVDF 复合薄膜的制备及介电性能研究[D]. 北京:北京理工大学, 2014.
- Wang Fangfang. Preparation and dielectric properties of CCTO / PVDF film[D]. Beijing:Beijing Institute of Technology, 2014.
- [4] 邓腾飞. CaCu₃Ti₄O₁₂ 陶瓷巨介电响应及掺杂研究[D]. 广州:华南理工大学, 2016.
- Deng Tengfei. Research of giant dielectric response and doping on CaCu₃Ti₄O₁₂ ceramics[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2016.
- [5] Chen Qin, Wang Yong, Zhou Xin, et al. High field tunneling as a limiting factor of maximum energy density in dielectric energy storage capacitors[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(14):424–490.
- [6] Boonlakhorn J, Thongbai P, Putasaeng B, et al. Microstructural evolution, non-ohmic properties, and giant dielectric response in CaCu₃Ti_{4-x}Ge_xO₁₂ ceramics[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2017, 100:3478–3487.
- [7] Li Yingyi, Li Wang, Du Guoping, et al. Low temperature preparation of CaCu₃Ti₄O₁₂ ceramics with high permittivity and low dielectric loss[J]. Ceramics International, 2017, 43(12):9 178–9 183.
- [8] Lu Dayong, Yu Xinyu, Liu Junwei. Mixed-valent structure dielectric properties and defect chemistry of Ca_{1-3x/2}Tb_xCu₃Ti_{4-x}Tb_xO₁₂ ceramics[J]. Ceramics International, 2017, 43(12):8 664–8 676.
- [9] Wang Binghao, Liu Limei, Huang Lizhen, et al. Fabrication and origin of high-k carbon nanotube / epoxy composites with low dielectric loss through layer-by-layer casting technique[J]. Carbon, 2015, 85:28–37.
- [10] Sachidanandan E R R, Paramanandam T, Sahadevan R. A comparative study on dielectric, structure and thermal behavior of micro-and nano-sized CCTO in nylon 6,9 matrix[J]. Polymer Composites, 2017, 38(5):927–935.
- [11] Chao Xiaolian, Wu Peng, Zhao Yang, et al. Effect of CaCu₃Ti₄O₁₂ powders prepared by the different synthetic methods on dielectric properties of CaCu₃Ti₄O₁₂ / polyvinylidene fluoride composites[J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2015, 26(5):3 044–3 051.
- [12] 马育红, 张先宏, 杨万泰. 聚合物基复合介电材料的研究进展[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2015, 42(3):1–15.
- Ma Yuhong, Zhang Xianhong, Yang Wangtai. Recent developments in polymer-based composites dielectric materials[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology:Natural Science Edition, 2015, 42(3):1–15.
- [13] 喻玥. 钛酸钡 / 聚偏氟乙烯高介电常数复合薄膜的制备与性能研究[D]. 北京:北京化工大学, 2010.
- Yu Yue. Fabrication and dielectric properties of the BaTiO₃ / Polyvinylidene fluoride composite thin films with high dielectric permittivity[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2010.
- [14] 李成良. 核-卫星结构钛酸钡-铜填充的聚偏氟乙烯基复合材料的制备与介电储能行为研究[D]. 深圳:深圳大学, 2016.
- Li Chengliang. Dielectric performance and energy storage behavior of BaTiO₃-Cu / PVDF composites with core-satellite structure fillers[D]. Shenzhen :Shenzhen University, 2016.
- [15] Liu Yang, Wang Wenchao, Huang Jiquan, et al. Dielectric properties of giant permittivity NaCu₃Ti₃NbO₁₂ ceramics[J]. Ceramics International, 2013, 39(8):9 201–9 206.
- [16] Chao Xiaolian, Wu Peng, Zhao Yang, et al. Effect of CaCu₃Ti₄O₁₂ powders prepared by the different synthetic methods on dielectric properties of CaCu₃Ti₄O₁₂ / polyvinylidene fluoride composites[J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2015, 26(5):3 044–3 051.
- [17] 张建中. BaTiO₃ / PVDF 复合电介质材料制备及性能研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2013.
- Zhang Jianzhong. Research on preparation and properties of BaTiO₃ / PVDF dielectric composites[D]. Changsha:National University of Defense Technology, 2013.
- [18] Gao Liwei, Wang Xijuan, Chen Yue, et al. Ni-coated CaCu₃Ti₄O₁₂ / low density polyethylene composite material with ultra-high dielectric permittivity[J]. Aip Advances, 2015, 5(8):87 182–87 186.
- [19] Chi Qingguo, Gao Liwei, Wang Xinlei, et al. Effects of magnetic field treatment on dielectric properties of CCTO@Ni / PVDF composite with low concentration of ceramic fillers[J]. Aip Advances, 2015, 5(11):117 103–117 108.
- [20] Feng Yu, Wang Jinping, Fei Weidong, et al. Core-shell structured BaTiO₃@carbon hybrid particles for polymer composites with enhanced dielectric performance[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(40):20 313–20 321.
- [21] Yang Yang, Sun Haoliang, Di Yin, et al. High performance of polyimide / CaCu₃Ti₄O₁₂@Ag hybrid films with enhanced dielectric permittivity and low dielectric loss[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(9):4 916–4 921.

日本推出塑料汽车的 90% 零部件由塑料制成

日本推出世界上首款 90% 零部件用各种塑料制成的汽车。据日本放送协会 (NHK) 报道, 新款概念车在政府创新技术计划框架下研制, 是东京大学科学家与汽车制造商协作的结果。由于使用了各种类型的塑料, 汽车质量比普通汽车

轻了 40%。就可以节省能源, 为电动汽车的发展开辟新的前景。此前普遍认为, 由于强度不足, 在汽车制造中使用塑料是不可能的。科学家通过将各种类型的塑料进行组合来解决这一问题。这是世界上首款 90% 重要零部件均由塑料制成的汽车。

(新浪财经)