



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113831692 A

(43) 申请公布日 2021. 12. 24

(21) 申请号 202111193409.6

C08F 255/02 (2006.01)

(22) 申请日 2021.10.13

C08F 220/32 (2006.01)

(71) 申请人 浙江元盛塑业股份有限公司

C08F 210/02 (2006.01)

地址 312500 浙江省绍兴市新昌县澄潭街  
道丰盛路8号

C08F 220/18 (2006.01)

申请人 浙江工业大学

C08F 220/28 (2006.01)

C09K 11/06 (2006.01)

(72) 发明人 徐立新 王文林 王清 叶会见

(74) 专利代理机构 杭州浙科专利事务所(普通  
合伙) 33213

代理人 吴秉中

(51) Int. Cl.

C08L 63/02 (2006.01)

C08K 9/12 (2006.01)

C08K 7/00 (2006.01)

C08K 3/38 (2006.01)

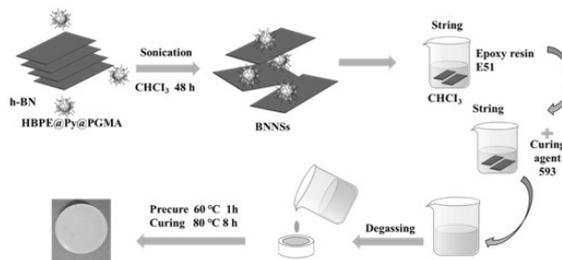
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54) 发明名称

一种改性氮化硼/环氧树脂荧光和介电复合  
材料及其制备方法

(57) 摘要

本发明涉及一种改性氮化硼/环氧树脂荧光  
和介电复合材料及其制备方法。本发明的复合材  
料以环氧树脂为基体,以非共价键改性的氮化硼  
纳米片为荧光和介电填料,所述的改性氮化硼是  
指通过CH- $\pi$ 和 $\pi$ - $\pi$ 非共价键作用力吸附在氮  
化硼表面的超支化聚乙烯共聚物HBPE@Py@PGMA,  
所述的HBPE@Py@PGMA是一种含有茈荧光基团和  
环氧基团接枝超支化聚乙烯的三元共聚物,所述  
的氮化硼是以超支化聚乙烯共聚物HBPE@Py@  
PGMA为稳定剂辅助液相剥离法制备的,本发明通  
过将改性氮化硼与环氧树脂、固化剂充分混合,  
加热固化得到氮化硼/环氧树脂荧光及介电复合  
材料。



1. 一种氮化硼/环氧树脂荧光和介电复合材料,其特征在于,其以环氧树脂为基体,以改性的氮化硼纳米片为填料;其中:所述改性的氮化硼纳米片为表面粘附着超支化聚乙烯共聚物HBPE@Py@PGMA的氮化硼。

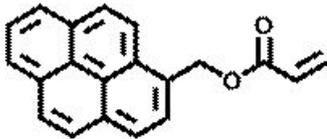
2. 根据权利要求1所述的氮化硼/环氧树脂荧光和介电复合材料,其特征在于,复合材料中还包括固化剂EP593。

3. 根据权利要求1所述的氮化硼/环氧树脂荧光和介电复合材料,所述的环氧树脂与固化剂的质量比为4:1。

4. 根据权利要求1所述的氮化硼/环氧树脂荧光和介电复合材料,其特征在于,复合材料中氮化硼纳米片的添加含量为0.1 wt%、0.3 wt%、0.5 wt%、0.8 wt%、1.0 wt%。

5. 根据权利要求1所述的氮化硼/环氧树脂荧光和介电复合材料,其特征在于,所述的超支化聚乙烯共聚物HBPE@Py@PGMA是一种茈荧光基团和环氧基团接枝的超支化聚乙烯。

6. 根据权利要求5所述超支化聚乙烯共聚物HBPE@Py@PGMA的茈荧光基团和环氧基团接枝超支化聚乙烯通过如下方法制备:利用Pd-diimine催化剂催化乙烯、式(I)所示的含茈荧光单体和带溴单体BIEA以一步法“链移走”共聚制备得到同时含有茈端基和酰溴端基的超支化三元共聚物HBPE@Py@Br;然后以超支化三元共聚物HBPE@Py@Br作为大分子引发剂,通过酰溴端基引发环氧单体GMA基于ATRP机理接枝共聚,得到茈荧光基团和环氧基团接枝超支化聚乙烯;



(I)。

7. 根据权利要求6所述的茈荧光基团和环氧基团接枝超支化聚乙烯的制备方法,包括以下步骤:

(1) 在乙烯保护下使式(I)所示的含茈荧光单体、带溴单体BIEA、Pd-diimine催化剂和无水级有机溶剂中在反应容器中混合,在一定的乙烯压力条件下搅拌聚合,充分反应后使聚合终止,经分离纯化得到同时含有茈端基和酰溴端基的超支化三元共聚物HBPE@Py@Br;

(2) 在氮气保护下使ATRP反应配体、超支化三元共聚物HBPE@Py@Br、CuBr、GMA、有机溶剂在反应容器中混合,进一步通氮除氧后密封反应器,充分聚合后经分离纯化得到茈荧光基团和环氧基团接枝超支化聚乙烯。

8. 根据权利要求书7所述的制备方法,其特征在于:步骤(1)中,所述的无水级溶剂选自下列之一:无水级二氯甲烷、三氯甲烷或氯苯;步骤(2)中,所述溶剂选自下列之一:甲苯,环己酮,苯甲醚;所述的ATRP反应配体选自下列之一:bpy(连二吡啶),PMDETA(N,N,N',N',N"-五甲基二亚乙基三胺)。

9. 根据权利要求1所述的一种氮化硼/环氧树脂荧光复合材料,其特征在于,制备改性的氮化硼的步骤和条件如下:

(1) 首先将六方氮化硼粉末和超支化聚乙烯共聚物HBPE@Py@PGMA在氯仿溶液中进行超声剥离;离心去除大块颗粒,收集上层分散液获得含游离聚合物的氮化硼分散液;

(2) 对步骤(1)所得的含有过量茈基化三元共聚物的氮化硼分散液进行高速离心或真空抽滤去除所含的过量共聚物,再次超声使之分散到有机溶剂氯仿后,获得超支化聚乙烯

共聚物HBPE@Py@PGMA功能化的氮化硼分散液；

(3) 对步骤(1)所述的超支化聚乙烯共聚物HBPE@Py@PGMA与六方氮化硼粉末的投料质量比为1:2；所述六方氮化硼粉末的加入量以所述的溶剂氯仿计量浓度为8mg/ml；所述的超声时间为48小时。

10. 根据权利要求1所述的一种氮化硼/环氧树脂介电复合材料，其特征在于，氮化硼/环氧树脂荧光复合材料的步骤和条件如下：

(1) 把权利要求9中步骤(2)得到的氮化硼分散液、环氧树脂E-51混合于烧杯中，加入氯仿溶液后在室温下25℃进行高速搅拌1小时使溶液混合均匀；

(2) 然后再将固化剂E593加到氮化硼环氧树脂混合溶液中在室温下25℃进行高速搅拌0.5小时使溶液混合均匀；

(3) 将步骤(2)所得混合溶液，在真空烘箱中室温下25℃真空抽滤5分钟以脱除气泡；

(4) 将步骤(3)得到的混合溶液混合物倒入聚四氟乙烯 (PTFE) 模具中，先在60℃预固化1小时然后在80℃固化8 h。

## 一种改性氮化硼/环氧树脂荧光和介电复合材料及其制备方法

### 技术领域

[0001] 本发明公开了一种氮化硼/环氧树脂荧光和介电复合材料及其制备方法。

### 背景技术

[0002] 环氧热固性树脂具有优良的电绝缘性、化学稳定性、加工方便等优点,在日用电子和制造业中有着广泛的应用。目前,开发具有特殊介电性能的功能环氧复合材料,为先进的尖端器件和高频通信技术铺平了道路。聚合物基复合材料的介电性能主要与基体、填充材料和界面性质相关,其中界面极化和电荷的积累,可以提高介电性能。化学改性可以改变环氧树脂的很多性能比如机械性能,荧光性能,热性能等等。与石墨烯结构相似的六方氮化硼(h-BN)是一种带隙为5.2 eV的电绝缘体,基于氮化硼的聚合物复合材料在先进电子器件的电绝缘体领域具有广阔的应用前景。

[0003] 芘作为一种重要的多环芳香族荧光分子,具有许多独特的光学性质,如高荧光量子产率、长荧光寿命、高激发基团形成倾向以及单体发射的极性依赖性等。在光激发下,两个芘分子之间的分子内或分子间 $\pi$ -堆叠相互作用可能由于聚集增强的激基缔合物发射(AEEE)而导致激基缔合物形成。利用芘功能化超支化共聚物在液相中剥离氮化硼纳米片(BNNSs),制备了具有荧光和介电性能的环氧树脂纳米复合材料。

### 发明内容

[0004] 本发明的第一个目的在于提供一种利用芘功能化超支化共聚物制备氮化硼的方法,该方法简单,可高效制备低缺陷的氮化硼分散液。

[0005] 本发明的第二个目的在于提供一种氮化硼/环氧树脂荧光和介电复合材料及其制备方法,该方法工艺简单,制备周期短,制备得到的复合材料介电常数较高且兼具有荧光发光性能。

[0006] 本发明从复合材料制备工艺、填料形貌及分布状态、界面设计等方面进行研究,该复合材料以环氧树脂为基体,以改性的氮化硼为填料,首先对氮化硼进行了非共价键功能化改性通过CH- $\pi$ 和 $\pi$ - $\pi$ 非共价键作用力吸附在氮化硼表面的超支化聚乙烯共聚物HBPE@Py@PGMA,本发明的氮化硼是以超支化聚乙烯共聚物HBPE@Py@PGMA为稳定剂辅助液相剥离法制备得到的,然后采用改性后的氮化硼为填料,采用极性较大的环氧树脂作为基体,制备氮化硼/环氧树脂荧光和介电复合材料,得到的复合材料介电常数提高损耗较低且具有较好的荧光发光性。

[0007] 本发明采用如下技术方案:

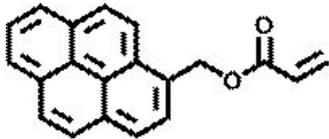
第一方面,本申请提供了一种氮化硼/环氧树脂荧光和介电复合材料及其制备方法,其包括超支化聚乙烯共聚物HBPE@Py@PGMA非共价键功能化改性的氮化硼、环氧树脂基体以及固化剂。

[0008] 所述的氮化硼/环氧树脂荧光和介电复合材料中,所述的环氧树脂为双酚A型树脂

E-51, 固化剂为EP593型。所述的氮化硼为通过CH- $\pi$ 和 $\pi$ - $\pi$ 非共价键作用力吸附在其表面的超支化聚乙烯共聚HBPE@Py@PGMA改性的氮化硼。

[0009] 所述的氮化硼/环氧树脂荧光和介电复合材料中,其特征在于,所述的超支化聚乙烯共聚物HBPE@Py@PGMA是一种芘荧光基团和环氧基团接枝的超支化聚乙烯。复合材料中氮化硼纳米片的添加含量为0.1 wt%、0.3 wt%、0.5 wt%、0.8 wt%、1.0 wt%。

[0010] 所述的氮化硼/环氧树脂荧光和介电复合材料中,所述超支化聚乙烯共聚物HBPE@Py@PGMA的芘荧光基团和环氧基团接枝超支化聚乙烯通过如下方法制备:利用Pd-diimine催化剂催化乙烯、式(I)所示的含芘荧光单体和带溴单体BIEA以一步法“链移走”共聚制备得到同时含有芘端基和酰溴端基的超支化三元共聚物HBPE@Py@Br;然后以超支化三元共聚物HBPE@Py@Br作为大分子引发剂,通过酰溴端基引发环氧单体GMA基于ATRP机理接枝共聚,得到芘荧光基团和环氧基团接枝超支化聚乙烯;其由实验室合成所得,具体合成步骤如下:



(I)

(1) 在乙烯保护下使式(I)所示的含芘荧光单体、带溴单体丙烯酸-2-(2-溴异丁酰氧基)乙酯(BIEA)、Pd-diimine催化剂和无水级有机溶剂中在反应容器中经一步链行走机理合成,在一定的乙烯压力条件下搅拌聚合,充分反应后使聚合终止,经分离纯化得到同时含有芘端基和酰溴端基的超支化三元共聚物HBPE@Py@Br;

(2) 在氮气保护下以HBPE@Py@Br为大分子引发剂、GMA为单体,联吡啶或PMDETA为ATRP反应配体CuBr为催化剂在环己酮溶剂中30℃下经原子转移自由基聚合(ATRP)反应4小时充分聚合后得到芘荧光基团和环氧基团接枝超支化聚乙烯三元共聚物HBPE@Py@PGMA。

[0011] 上述步骤(1)中,聚合反应条件优选为在25℃、乙烯压力1 atm条件下搅拌反应24小时。

[0012] 上述步骤(1)中,所述的分离提纯步骤为:

将所得反应混合液A直接暴露于空气中,室温下通过搅拌和冷风吹扫逐步去除溶剂,使聚合终止,得到聚合粗产物。将聚合粗产物搅拌溶解于四氢呋喃中,后加入少量盐酸和双氧水(以四氢呋喃体积计,每10 mL各加入3~5滴),室温下搅拌0.5~24 h溶解产物中所含的少量钯颗粒,后通过空气吹扫去除溶剂,获得聚合产物;将所得聚合产物溶解于四氢呋喃中,搅拌使之溶解,加入体积为所用四氢呋喃的2~20倍的甲醇使产物沉淀,去除上层溶液得沉淀物,重复步骤1~3遍,获得纯化的聚合产物;最终将所得纯化的聚合产物于25~100 °C下真空干燥8~72 h,得到芘荧光基团和环氧基团接枝超支化聚乙烯三元共聚物HBPE@Py@PGMA。

[0013] 本发明所述的氮化硼纳米片的制备方法具体为:将溶有HBPE@Py@PGMA聚合物的有机溶剂氯仿倒入装有一定量的六方氮化硼粉末的玻璃瓶中,用膜封好瓶盖,放入超声池中室温下超声8~72h,超声功率可选为100~320W,超声完成后取出混合液装入离心管中离心,转速可控制在1000~5000rpm,该离心过程主要是去除块状未剥离的六方氮化硼粉末,对离心所得的含有过量芘基化三元共聚物的氮化硼分散液进行真空抽滤去除所含的过量共聚物,再次超声使之分散到有机溶剂后,获得超支化聚乙烯共聚物HBPE@Py@PGMA功能化的氮

化硼分散液。作为优选,所述的超支化聚乙烯共聚物HBPE@Py@PGMA与六方氮化硼粉末的投料质量比为1:2;所述六方氮化硼粉末的加入量以所述的溶剂氯仿计量浓度为8mg/ml;所述的超声时间为48小时。

[0014] 在上述氮化硼纳米片的制备方案中,六方氮化硼粉末在HBPE@Py@PGMA的辅助下,在有机溶剂氯仿中剥离成氮化硼纳米片(BNNSs),该方法巧妙地利用了HBPE@Py@PGMA能在溶剂中剥离六方氮化硼粉末得到BNNSs,并且通过CH- $\pi$ 和 $\pi$ - $\pi$ 非共价键作用力吸附在氮化硼表面,阻止BNNSs团聚。

[0015] 第二方面,本发明还提供一种上述氮化硼/环氧树脂荧光和介电复合材料及其制备方法,具体步骤如下:

(1)把经真空抽滤去除所含的过量共聚物得到的氮化硼分散液、环氧树脂E-51混合于烧杯中,加入氯仿溶液后在室温下25℃进行高速搅拌1小时使溶液混合均匀;

(2)然后再将固化剂EP593加到氮化硼/环氧树脂混合溶液中在室温下25℃进行高速搅拌0.5小时使溶液混合均匀;

(3)将步骤(2)所得混合溶液,在真空烘箱中室温下25℃真空抽滤5分钟以脱除气泡;

(4)将步骤(3)得到的混合溶液倒入聚四氟乙烯(PTFE)模具中,在恒温鼓风干燥箱中先在60℃预固化1小时然后在80℃固化8 h。

[0016] 本发明中所述的氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料,复合材料中氮化硼的添加含量为0.1 wt%、0.3 wt%、0.5 wt%、0.8 wt%、1.0 wt%,所述的环氧树脂与固化剂的质量比为4:1。

[0017] 与现有技术相比,本发明的有益效果在于:

(1)本发明以茈功能化的超支化聚乙烯三元共聚物HBPE@Py@PGMA在一般的有机溶剂氯仿中液相剥离得到氮化硼纳米片,同时超支化结构和纳米片的表面的相互作用使得目标聚合物吸附在纳米片表面,起到表面修饰填料的作用,填料在聚合物基体中分散性良好,界面相互作用强。

[0018] (2)本发明通过粘附在氮化硼表面的同时含茈端基(Py)的HBPE核和聚甲基丙烯酸缩水甘油酯(PGMA)侧链的超支化聚乙烯三元共聚物HBPE@Py@PGMA,使得氮化硼/环氧树脂介电复合材料在本发明所制备的纳米复合材料具有较高的介电常数、低介电损耗的同时兼具好的荧光发光性能。

## 附图说明

[0019] 图1为氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料的制备流程图

图2为不同石墨烯添加含量的氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料在自然光和365nm紫外光下的光学照片

图3为不同氮化硼添加含量的氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料的介电常数

图4为不同氮化硼添加含量的氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料的介电损耗

图5为氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料在1000Hz时的介电性能

图6为氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料的荧光发射光谱

图7为氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料的茈准分子单体 $I_E/I_M$ 强度比

图8为不同石墨烯添加含量的氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料的断面SEM形貌图。

### 具体实施方式

[0020] 下面结合实施例对本发明做进一步阐述,但不是对本发明的限定。

[0021] 实施例0:

所述的HBPE@Py@PGMA即同时含苊端基(Py)的HBPE核和聚甲基丙烯酸缩水甘油酯(PGMA)侧链的苊基化超支化聚乙烯三元共聚物,其由实验室合成所得,具体合成步骤为:

(1)取洁净并严格干燥的100mL Schlenk瓶,,在环己酮溶剂中,联二吡啶为配体、CuBr为催化剂,引发GMA单体聚合,具体配比为GMA:Br:CuBr:bpy= 200:1:1:2先后按比例加入154mmol的GMA单体、25mL环己酮、0.770mmol 的HBPE@Py@Br和1.540mmol的联二吡啶(bpy)。

[0022] (2)对混合液进行冷冻-抽真空-解冻三次以保证聚合过程的无水无氧环境,接着在氮气气氛下迅速加入0.770mmol的CuBr,密封后在30℃下反应4h。

[0023] (3)反应进行至预定时间后,将上述反应瓶浸入冰水浴中终止反应,随后冷风将溶液吹扫至干,加入THF使产物溶解后,继续滴加甲醇使产物沉淀,最后倒出上清液。重复此步骤3次以纯化产物。

[0024] (4)上述产物转移以离心管中,置于真空烘箱中60℃下干燥24h,获得黄白色固体粉末即为HBPE@Py@PGMA。

[0025] 实施例1:

步骤一:称取0.32g的HBPE@Py@PGMA于玻璃瓶中,加入30mL 氯仿,搅拌辅助共聚物HBPE@Py@PGMA充分溶解后,再将0.64g的六方氮化硼粉末加入玻璃瓶中,最后补加50mL DMF(以六方氮化硼粉末在氯仿中的质量记为8mg/mL),同时密封好瓶盖大批量制备了12瓶的氮化硼分散液。

[0026] 步骤二:将步骤一中处理好的混合液放入室温的水浴超声池中超声48h,超声功率选为240W。

[0027] 步骤三:将步骤二中超声处理后的混合液取出装入离心管中,以4000rpm离心45min,主要去除未剥离的块状六方氮化硼粉末。然后取上清液保存,即为氮化硼纳米片(BNNSs)的分散液。

[0028] 步骤四:取步骤三中的分散液400mL,通过真空抽滤去除所含的过量共聚物,再次超声使之分散到有机溶剂氯仿后,重复以上操作3遍后量取20ml收集的分散液于真空烘箱中烘干至恒重,即为BNNSs,其中HBPE@Py@PGMA占BNNSs质量的80.0%。之后加入氯仿(以BNNSs在溶剂中的质量记为2.3mg/mL),重新超声分散2h待用。

[0029] 步骤五:取步骤三氮化硼分散液10.2mg,称取0.4g的环氧树脂,量取4ml氯仿一同置于一100ml的烧杯中于室温25℃磁力搅拌1小时使得环氧树脂与石墨烯在氯仿溶剂中混合均匀。

[0030] 步骤六:然后再将0.1g的固化剂EP593加到步骤五中的氮化硼/环氧树脂混合溶液中在室温下25℃进行磁力搅拌0.5小时使溶液混合均匀。

[0031] 步骤七:将步骤六所得混合溶液,在真空烘箱中室温下25℃真空抽滤5分钟以脱除

气泡。

[0032] 步骤八：将步骤七得到的混合溶液倒入一直径为3cm厚度1mm的聚四氟乙烯 (PTFE) 模具中,在恒温鼓风干燥箱中先在60°C预固化1小时然后在80°C固化8 h得到固化后的氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料。

[0033] 实施例1为添加含量为0.8wt% BNNSs的氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料,以上所述为本发明的优选实施方式。氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料的制备流程示意图如图1所示,图2为不同氮化硼添加含量的氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料在自然光和365nm紫外光下的光学照片,图3和图4分别为不同氮化硼添加含量的氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料的介电常数和介电损耗,图5则为不同氮化硼添加含量的氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料在1000Hz时的介电常数和介电损耗。图6为氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料的荧光发射光谱,图7为氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料的芘准分子单体 $I_E/I_M$ 强度比,图8为不同石墨烯添加含量的氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料的断面SEM形貌图。

[0034] 表征与测试

所得复合材料在其表面涂覆一层1~3 $\mu\text{m}$ 厚的导电银层作为电极,面积大约为1 $\text{cm}^2$ ,用精密阻抗分析仪(4294A LCR, Agilent, USA)测试其频率相关的电容和损耗角,频率范围在 $10^2\sim 10^7\text{Hz}$ ,计算各复合材料的介电常数和介电损耗。

[0035] 荧光光谱分析测试,采用日立集团生产的型号为F-4600的荧光分光光度计,其起始波长为300nm,终止波长650nm,扫描速度2400nm/min,监控波长350nm,光栅大小5.0nm $\times$ 5.0nm,测试温度为常温,溶液相和固相均可直接测量。

[0036] 测试结果比较与分析

图2(a)和(b)为BNNSs/环氧树脂复合材料在自然光和365nm紫外光下的光学照片。氮化硼纳米片的加入仍具有较强的荧光性能。

[0037] 图3为不同氮化硼添加含量的氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料的介电常数,显示了纯环氧树脂(EP)和各种BNNSs/EP复合材料的介电常数。如图3所示,介电常数仅随填料添加含量的增加而增加,在整个研究频率范围内表现出良好的频率稳定性。当填料含量达到0.8 wt%时,介电常数显著提高,当HBPE@Py@PGMA由于非共价键CH- $\pi$ 和 $\pi$ - $\pi$ 叠加作用而附着在BNNSs上时,由于有机环氧基体与无机氮化硼填料之间的中间界面的出现,复合材料的界面极化和介电常数增加。

[0038] 图4为不同氮化硼添加含量的氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料的介电损耗。总的来说,随着填料负载的增加,复合材料的介电损耗略有升高。当BNNSs添加含量从0 wt%增加到1.0 wt%时,所有样品的介电常数和损耗都呈现出相同的频率稳定性趋势。

[0039] 图5为不同氮化硼添加含量的氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料在1000Hz时的介电性能结果表明,介质介电常数、介质损耗填料负载的增加而增加。当填充量达到0.8 wt%时,材料的介电常数急剧增加,达到13.2,当氮化硼的填充量为1.0 wt%时,复合材料的介电常数提高到16.3,是原始E-51环氧树脂的3倍。

[0040] 图6为氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料的荧光发射光谱。芘单体和准分子缔合态的荧光发射明显不同。与激基分子的发射波长( $\lambda_{em}$  480 nm)相比,单体态的发射具有较短波长( $\lambda_{em}$  380 nm)的振动结构。随着BNNSs含量从0.1wt%增加到0.8 wt%,由于芘激基缔合物的荧光发射强度与浓度有关,复合物的荧光发射强度逐渐增大。

[0041] 图7为氮化硼/环氧树脂介电荧光复合材料的苝准分子单体 $I_E/I_M$ 强度比。利用苝的准分子的发射强度(峰高)与单体强度的比值来计算苝准分子单体比( $I_E/I_M$ )。如图7所示,当氮化硼纳米片含量从0.1到1.0 wt%时,苝准分子-单体强度比( $I_E/I_M$ )从0.61增加到1.05。

[0042] 图8为纯环氧树脂和BNNSs/环氧复合材料的断裂SEM图。图8a原始树脂断裂表面的SEM图像表面光滑无特征,这是均质热固性聚合物脆性断裂的典型现象。图8 b-f中,加入BNNSs后,断口表面变得粗糙。我们还可以发现BNNSs均匀分散在基体中,这可能是由于通过CH- $\pi$ 和 $\pi$ - $\pi$ 非共价键作用力吸附在石墨烯表面的超支化聚乙烯共聚物HBPE@Py@PGMA通过化学共价键参与环氧树脂。固化反应增加了纳米填料在有机基质中的相容性。

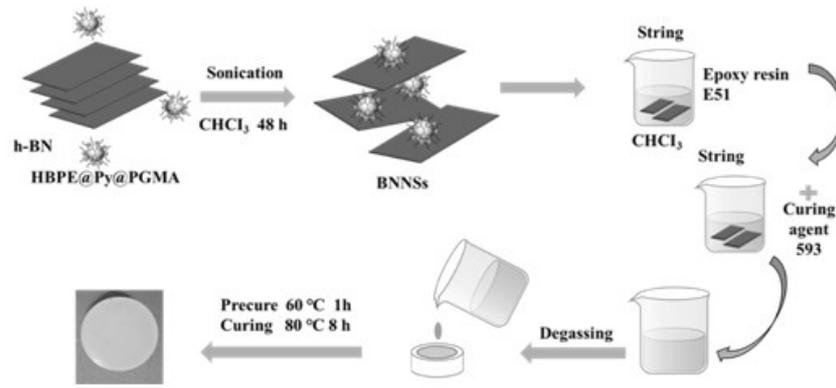


图1

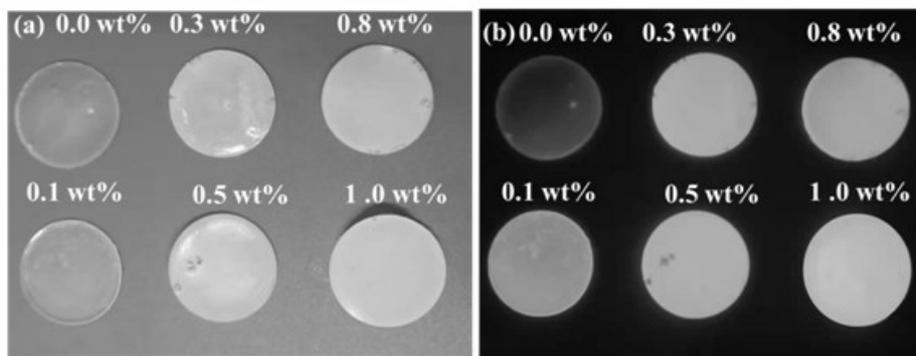


图2

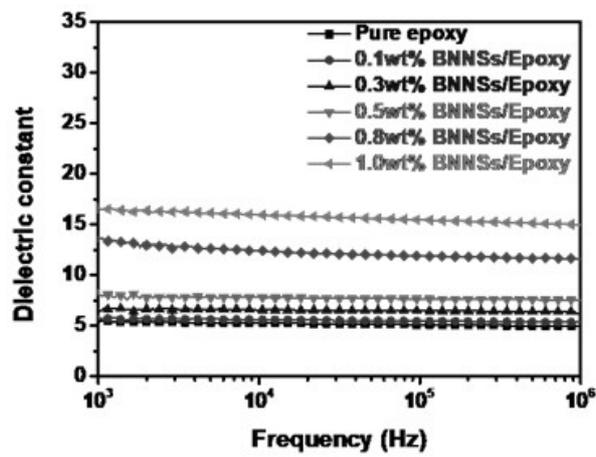


图3

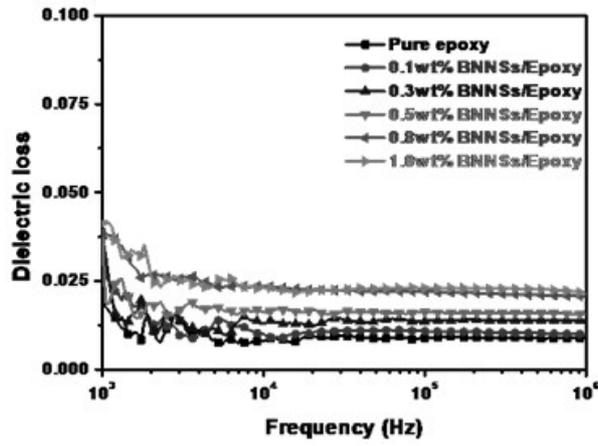


图4

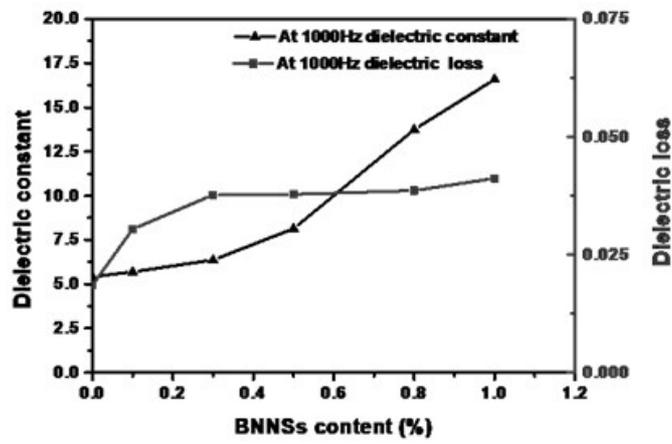


图5

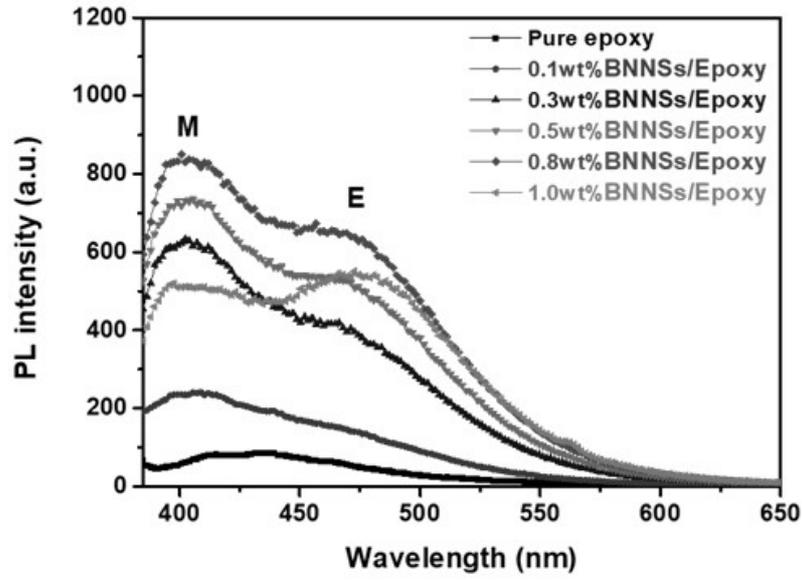


图6

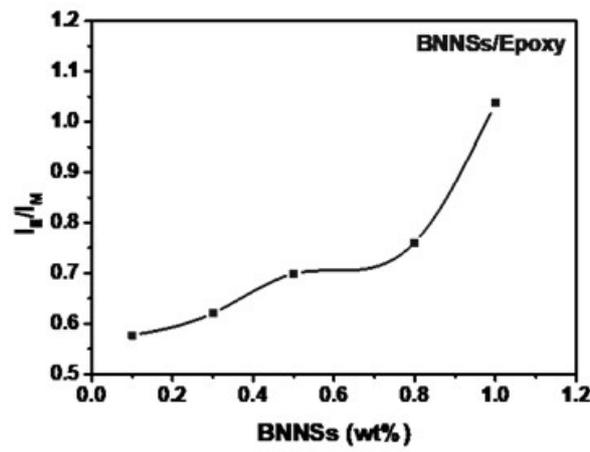


图7

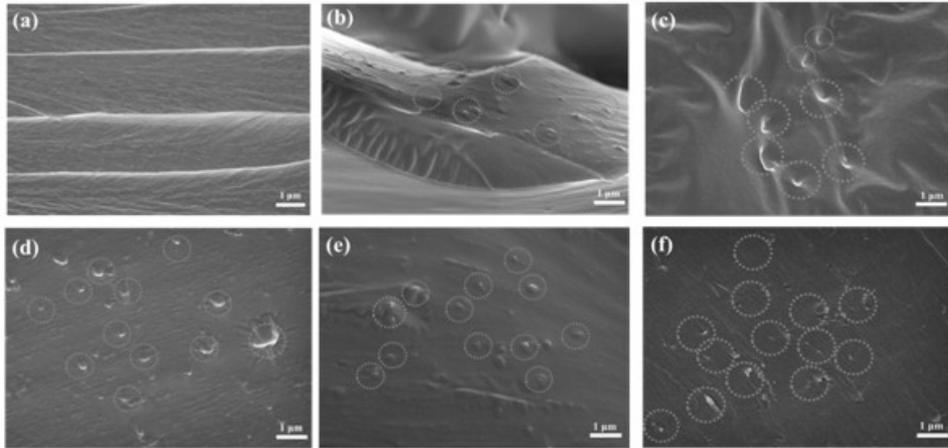


图8