

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.09.006

氰酸酯树脂 / 纳米立方氮化硼复合材料制备及性能

祝保林¹, 姚焕英²

(1. 渭南师范学院环境与生命科学学院, 陕西渭南 714099; 2. 渭南师范学院化学与材料学院, 陕西渭南 714099)

摘要: 将纳米立方氮化硼 (CBN) 粒子加入氰酸酯 (CE) 树脂单体中, 以二月桂酸二丁基锡为引发剂, 定量加入环氧树脂, 制得 CE / 纳米 CBN 复合材料浇铸体。测试了复合材料浇铸体型材的力学性能、玻璃化转变温度 (T_g) 和耐酸、碱腐蚀性能。结果表明, 当纳米 CBN 粒子含量为 CE 树脂单体质量的 5.0% 时, 复合材料的冲击强度和弯曲强度均达到最大值, 分别达到 15.92 kJ/m² 和 165.47 MPa, 较纯 CE 树脂分别提高 81.94%, 95.82%; 耐酸、碱腐蚀性能都达到最佳, 强酸 (浓 H₂SO₄)、强碱 (饱和 NaOH) 的腐蚀率分别为 0.08%, 0.06%, 比 CE 树脂分别降低 55.6%, 76.0%; 当纳米 CBN 粒子含量为 6.0% 时, 复合材料的耐热性能得到改善, T_g 为 315.40℃, 比纯 CE 树脂提高 23.40%。

关键词: 氰酸酯树脂; 纳米立方氮化硼; 力学性能; 微观形貌; 玻璃化转变温度; 耐酸、碱腐蚀性能

中图分类号: TQ327, TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)09-0032-06

Preparation and Properties of Cyanate Ester Resin / Nano Cubic Boron Nitride Composites

Zhu Baolin¹, Yao Huanying²

(1. College of Environment and Life Sciences, Weinan Normal University, Weinan 714099, China;

2. College of Chemistry and Materials, Weinan Normal University, Weinan 714099, China)

Abstract: Cyanate ester (CE) / nano CBN composite casting bodys were prepared by adding nano cubic boron nitride (CBN) particles into CE resin monomers, using dibutyltin dilaurate as initiator and quantitative addition epoxy resin. The mechanical properties, glass transition temperature (T_g) and acid and alkali corrosion resistance of composite casting profiles were tested. The results show that when the content of nano CBN particles is 5.0% of the mass of CE resin monomers, the impact strength and bending strength of the composite reach the maximum value of 15.92 kJ/m² and 165.47 MPa, which are 81.94% and 95.82% higher than those of pure CE resin, respectively, and the corrosion resistance of the composite to acid and alkali is the best, and the corrosion rates of high concentration acid (H₂SO₄) and high concentration alkali (NaOH) is 0.08% and 0.06%, which are 55.6% and 76.0% lower than those of pure CE resin, respectively. When the content of nano CBN particles is 6.0% of the mass of CE resin monomers, the heat resistance of the composite is improved, and T_g is 315.40℃, which is 23.40% higher than that of pure CE resin.

Keywords: cyanate ester resin; nano cubic boron nitride; mechanical property; microscopic morphology; glass transition temperature; corrosion resistance of acid and alkali

氰酸酯 (CE) 树脂是继环氧树脂和聚氨酯树脂之后, 被开发利用的另一类功能性热固性树脂^[1-2]。在特殊工艺条件下, CE 树脂单体可发生自由基聚合反应, 得到力学性能、耐热性能优异的固化产物, 但由于 CE 树脂固化产物有三嗪环结构 (高度对称结构, 交联密度大) 生成, 致使该树脂固化产物硬度大、韧性较差^[3-5]。目前, 经改性后的 CE 树脂常被

用作军工领域的功能材料^[6-7]。因此, 通过添加无机、有机改性剂, 一方面对 CE 树脂基体增韧改性; 另一方面, 通过添加功能性添加剂, 以使该类树脂获得基体树脂不具备的新功能, 研发新型功能复合材料, 以拓展其应用领域, 已成为该领域的研究热点^[8]。

据文献报道^[9], 在有机树脂基体中, 通过功能性第二相 (包括无机金属与非金属相、金属与非金属

基金项目: 广西科技厅重点基金项目 (2017AB53025), 陕西省教育厅专项基金项目 (201118197), 渭南师范学院专项 (2019JYKX009)

通讯作者: 祝保林, 硕士, 教授, 主要从事复合材料和功能材料的研究 E-mail: zhubaolin1975@163.com

收稿日期: 2020-07-06

引用格式: 祝保林, 姚焕英. 氰酸酯树脂 / 纳米立方氮化硼复合材料制备及性能 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(9): 32-37.

Zhu Baolin, Yao Huanying. Preparation and properties of cyanate ester resin / nano cubic boron nitride composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(9): 32-37.

氧化物相及掺杂材料相)的引入,对基体的各项性能(摩擦、力学、耐热、导热、耐腐蚀性能等)都可起到调控作用。原因在于:功能性第二相的引入,与基体树脂之间不仅仅只是发生了物理填充作用,功能性第二相会与有机树脂基体发生共聚、交联或偶联反应,产生协同作用,对复合体系聚合产物的微观结构实现了适度调控,从而改变、改善了固化产物的宏观性能。同时,由于引入的第二相自身就是“功能性材料”,可将自身具备的“新功能”引入复合体系,以弥补基体树脂的不足和缺陷。为此,笔者优选了具有“白石墨”之称的纳米立方氮化硼(CBN)作为第二相,以期在改善CE树脂自身缺陷的同时,能够为复合材料赋予新的功能,以拓展其用途。

1 实验部分

1.1 主要原材料

双酚A型CE树脂单体:SD-1-A,分析纯,浙江金立源药业有限公司;

环氧树脂(EP):EP-54,分析纯,无锡钱广化工原料有限公司;

二月桂酸二丁基锡(BDTL):分析纯,成都先科化工股份有限公司;

纳米CBN粒子:粒径10~30 nm,上海乃欧纳米科技有限公司;

耐高温真空硅脂:7900型,北京巩华特种油制品有限公司;

H₂SO₄:浓度18 mol/L,分析纯,上海晶纯生化科技股份有限公司;

丙酮:分析纯,西安试剂厂;

NaOH:分析纯,上海晶纯生化科技股份有限公司。

1.2 主要仪器与设备

扫描电子显微镜(SEM):Quanta-200型,美国FEI公司;

高速剪切机:FT-2200型,上海科学实验器材有限公司;

黏度计:NDJ-1型,上海科学实验器材有限公司;

恒温真空干燥箱:DZF-6500型,上海琅轩企业发展有限公司;

冲击强度测定仪:JBD-Y型,济南凯铎试验机制造有限公司;

数显万能材料试验机:WDW-S型,山东万辰试验机有限公司;

差示扫描量热(DSC)分析仪:Q2000型,美国TA公司;

恒温磁力搅拌器:DZ-101S型,郑州长城科工贸有限责任公司;

电热鼓风干燥箱:ZP-100型,重庆银河实验仪器有限公司;

电子天平:CL224-1SCN型,北京赛多利斯仪器系统有限公司;

复合材料浇铸体型材成型模具:自制。

1.3 复合材料浇铸体型材的制备

(1) CE树脂单体预处理。

在鼓风干燥箱($\leq 75^{\circ}\text{C}$)内,将粉末状CE树脂单体鼓风干燥30 min后,转入硅胶干燥器内冷却至室温,以除去水分,密封备用。

(2) 纳米CBN粒子预处理。

在鼓风干燥箱($105\sim 110^{\circ}\text{C}$)内,将纳米CBN粒子鼓风干燥60 min后,转入硅胶干燥器内冷却至室温,以除去水分,密封备用。

(3) 复合材料浇铸体型材的制备。

CE/纳米CBN复合材料配方列于表1。称取50 g经预处理的CE树脂单体于100 mL小烧杯中,按照表1配比定量加入EP,于 $85\sim 90^{\circ}\text{C}$ 油浴加热溶解,加入引发剂BDTL,强力剪切分散30 s,再定量加入经预处理的纳米CBN粒子,恒温,再次强力剪切分散30 s,转入平底烧瓶(配合磁力搅拌器)中,油浴($85\sim 90^{\circ}\text{C}$)预聚至适宜黏度($3.0\sim 4.0\text{ Pa}\cdot\text{s}$)^[2],撤热源,加入稀释剂丙酮,振荡均匀后,定量转入已预热至 85°C 左右的模具中。

趁热将模具移入真空恒温箱中,机械泵抽真空(-0.070 MPa),维持真空度90~120 min后,按既定固化工艺完成固化,自然冷却,按国标要求裁割型材,密封备用。

表1 CE/纳米CBN复合材料配方

序号	CE树脂单体质量/g	EP质量/g	BDTL质量/g	纳米CBN粒子质量/g	纳米CBN粒子含量/%
1 [#]	50.00	2.00	0.025	0.00	0.0
2 [#]	50.00	2.00	0.025	0.50	1.0
3 [#]	50.00	2.00	0.025	1.00	2.0
4 [#]	50.00	2.00	0.025	1.50	3.0
5 [#]	50.00	2.00	0.025	2.00	4.0
6 [#]	50.00	2.00	0.025	2.50	5.0
7 [#]	50.00	2.00	0.025	3.00	6.0
8 [#]	50.00	2.00	0.025	3.50	7.0
9 [#]	50.00	2.00	0.025	4.00	8.0
10 [#]	50.00	2.00	0.025	4.50	9.0

注:纳米CBN粒子含量是指纳米CBN粒子质量占CE树脂单体质量的百分比。

1.4 性能测试与表征

(1) 力学性能测定。

按 GB/T 2570-1995 测定弯曲强度,按 GB/T 2571-1995 测定冲击强度。

(2) SEM 表征。

取复合材料浇注体型材新断面,以氩离子轰击制备镜面,真空状态下,断面溅射镀 15~30 nm 厚的金膜,通过 SEM 观察断面微观形貌。

(3) 玻璃化转变温度 (T_g) 测定。

用 DSC 法测定 T_g 。载气为氮气,纯度 $\geq 99.9\%$,载气流量 50 mL/min,温度范围 0~350℃,升温速率 10℃/min。

(4) 复合材料耐酸碱腐蚀率测定。

取力学性能测试样条,在鼓风干燥箱内于 105~110℃ 下干燥至恒重,电子天平准确称重。室温下,分别于浓 H_2SO_4 和饱和 NaOH 溶液中浸泡 72 h 取出,以滤纸吸干表面残液后,再于鼓风干燥箱内于 105~110℃ 下干燥至恒重后,电子天平准确称重,按照式 (1) 计算复合材料的耐酸、碱腐蚀率 (平行试验 5 次,腐蚀率取平均值)^[1]:

$$\text{腐蚀率} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_1 ——干燥恒重后,酸、碱浸泡前的质量, g;

m_2 ——干燥恒重后,酸、碱浸泡后的质量, g。

2 结果与讨论

2.1 黏度法确定固化工艺

称取 5 g CE 树脂单体与 0.2 g EP,定量转入 50 mL 干燥洁净的小烧杯中,油浴融化,加入相应配比的引发剂 BDTL,强力剪切分散 30 s 后,于 85~90℃ 油浴预聚。以黏度计测体系黏度,达到适宜黏度 (3.5~4.0 Pa·s,在此黏度下,可以保证预聚体具备适当的流动性,再定量转移至经预热的模具中,防止原料与烧杯内壁的粘连损失)。

固化工艺的确定,主要考虑以下 3 点因素^[1]: 引发剂 BDTL 浓度、固化温度和反应时间。引发剂 BDTL 浓度取课题组前期实验数据 (引发剂占 CE 树脂单体质量的 0.05%); 由于 CE 树脂单体在无引发剂存在条件下,自聚温度为 115℃ 左右,故在引发剂浓度不变条件下,以黏度数值为依据,在 95~220℃ 范围内,共选取 10 个温度点进行固化时间的优化,即固定引发剂浓度不变,研究在不同温度下,体系达到适宜黏度时需要的时间,也称为平板小刀法。

需要强调的是,在 CE 树脂单体的自聚温度 (115℃) 以下,体系必须停留适宜时间,确保预聚度达标,体系黏度适宜。原因在于: 第一,体系黏度过高时,一方面,体系流动性差,原料与烧杯内壁的粘连,无法定量转入模具中; 另一方面,杂质或低沸点气体气化后,产生的气泡无法从高黏度体系中排除,滞留在体系内部,体系固化后,在复合材料浇铸体型材内部形成蜂窝体,导致复合材料浇铸体型材报废^[10]; 第二,体系黏度过低,预聚体沸点低。当升温至下一较高温度点时,低预聚度的预聚体便会气化挥发损失,从而改变复合体系配比^[8]。

由实验结果确定的固化工艺为: 95℃ / 2 h → 100℃ / 2 h → 110℃ / 2 h → 115℃ / 1 h → 120℃ / 2 h → 130℃ / 1 h → 150℃ / 1 h → 180℃ / 0.5 h → 200℃ / 0.5 h, 后固化工艺为 220℃ 下 0.25 h。

2.2 不同纳米 CBN 粒子含量对复合材料力学性能的影响

不同纳米 CBN 粒子含量的复合材料的冲击强度与弯曲强度如图 1 所示。

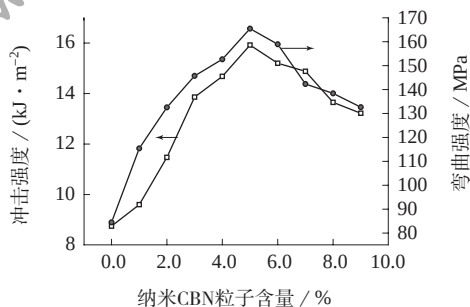


图 1 不同纳米 CBN 粒子含量的复合材料的弯曲强度与冲击强度

由图 1 可知,随纳米 CBN 粒子含量的增加,复合材料的冲击强度、弯曲强度均呈先增后减趋势。当纳米 CBN 粒子含量为 5.0% 时,冲击强度、弯曲强度均达到峰值,分别为 15.92 kJ/m² 和 165.47 MPa,与纯 CE 树脂的冲击强度 8.75 kJ/m²、弯曲强度 84.5 MPa 相比,分别提高了 81.94% 和 95.82%。当纳米 CBN 粒子含量达到 9.0%,复合材料的冲击强度为 13.22 kJ/m²,弯曲强度为 132.65 MPa,仍高于纯 CE 树脂基体的力学性能,同步实现了 CE 树脂的增强增韧。

(1) 复合材料力学性能的影响因素。

纳米 CBN 粒子引入到 CE 树脂中,属于复合材料强化方式中的第二相引入强化方式,当其含量由 0.0% 增加到 5.0% 时,复合材料的力学性能均呈上

升趋势。

试验制备的复合材料浇铸体属于型材,对于型材的断裂,可以借用银纹断裂机理^[2]解释。当纳米 CBN 粒子被引入后,第一,纳米 CBN 粒子粒径小、比表面积大、表面残键(不饱和键)较多,固化过程中,其不仅仅是通过物理填充方式发挥作用,而且通过表面残键与基体碳链上的活性点发生键合作用,即第二相通过键合起到了“铆钉”作用。在复合材料承受外加载荷时,由于“铆钉”的数量及均匀分布状态,使其力学性能得到提升,即在外加载荷作用下产生银纹,当银纹生长到“铆钉”周边时,由于“铆钉”周边化学键交联密度大,对银纹的生长和加深产生阻挠,银纹会绕过“铆钉”部位,由前期的直线生长,转为弯曲扩散,产生位错。由于位错现象的产生,周边基体碳链会产生微小的塑性形变,分散内应力。第二,由于基体树脂自身为三嗪环空间网络结构,交联密度大,刚性强,韧性差。在固化过程中,纳米 CBN 粒子可部分阻断 CE 基体树脂的自身交联,有效调整基体树脂生成的三嗪环数目,适当降低基体树脂自身的交联密度,增强其韧性。第三,纳米 CBN 粒子自身为刚性粒子,硬度大^[11]。适量纳米 CBN 粒子的引入,就其自身的刚性而言,也保证了复合材料力学性能的提高。

当纳米 CBN 粒子引入量过大($\geq 5.0\%$)时,反而会导致复合材料力学性能下降。原因在于:第一,“铆钉”点部位的纳米 CBN 粒子在阻碍银纹扩散的同时,内应力作用导致的位错点在“铆钉”周边产生聚集现象。位错点的集中,导致该区域相容性减弱,在外加载荷作用下,会造成第二相粒子周边直接产生宏观裂纹,不再遵循银纹断裂机理。第二,当第二相含量过高时,树脂基体自身交联所生成的三嗪环过少,体系交联密度过低,造成复合材料力学性能降低。

综上所述,在复合材料中添加纳米 CBN 粒子含量为 5.0% 时为力学性能最佳点,此时复合材料的冲击强度、弯曲强度均达到峰值。

(2) 复合材料微观形貌的相关力学分析。

复合材料力学性能的优劣,理论上可通过复合材料断面微观形貌予以表征。不同纳米 CBN 粒子含量的复合材料 SEM 照片如图 2 所示。

由图 2a 可以看出,纯 CE 树脂基体呈现为平滑的水纹状断面(典型脆性断面形貌),整体平整,未出现第二相纳米 CBN 粒子表面残键与基体碳链上

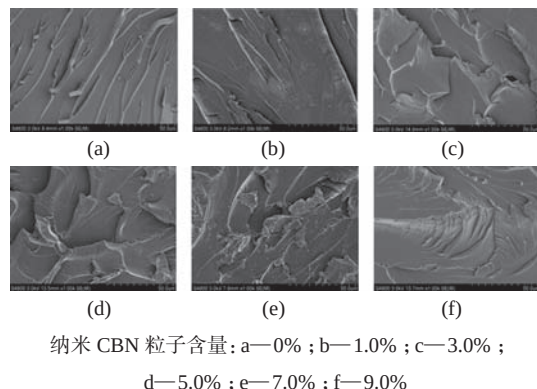


图 2 不同纳米 CBN 粒子含量的复合材料断面 SEM 照片

活性点通过化学键合所引起的“韧窝”形貌^[12],“韧窝”形貌是典型的韧性断裂形貌。

纳米 CBN 粒子引入基体后,复合材料断面微观形貌逐渐改变。由图 2b 可看出,相比于图 2a,复合材料微观形貌开始转变,“韧窝”尚未成型,断面表层尚光滑,未完全摆脱水纹状形貌,但存在水纹加粗变深现象,说明由于第二相引入量小,两相间化学键合作用仍较弱,相容性较差。纳米 CBN 粒子对力学性能的改善还没有起到主导作用。由图 2c 可看出,水纹状脆性断裂形貌基本消失,微观形貌已呈现出韧性断裂的“韧窝”形貌,但此时出现的韧窝数目少、深度浅,且分布不均。说明第二相引入量仍尚小,两相间键合作用仍然较弱,体系交联密度小。由图 2d 可看出,“韧窝”数目不仅增多、而且“韧窝”分布均匀且深。“韧窝”周边两相间化学键合所造成的撕裂翻起现象明显,说明第二相与基体间化学键合作用较强,交联密度大,纳米 CBN 粒子对体系力学性能的改善已起到主导作用,断面为典型的韧性断裂微观形貌^[13-14]。也就是说,当纳米 CBN 粒子含量达到 5.0% 时,一方面通过表面残键与基体碳链活性点之间的键合作用,增大了两相间的交联密度,减小了两相间的相分离;另一方面通过两相间的化学键合,部分阻断了有机基体碳链自身的交联聚合,调整了基体三嗪环的交联密度,延长了基体碳链长度,有效提高了复合材料的力学性能,这与前述理论分析一致。

当纳米 CBN 粒子含量达到 7.0% 时,“韧窝”数目又开始减少,且分布又趋于不均匀,如图 2e 所示。原因在于^[2]:加入的纳米 CBN 粒子此时开始过量,有机基体碳链上的活性点与无机粒子表面残键反应完全后,过量的纳米 CBN 粒子开始以物理填充方式进入体系,造成相分离加剧,同时,由于纳米 CBN

粒子的阻碍作用,基体自身聚合度大幅减弱,交联密度降低,碳链缩短,宏观表现为力学性能下降。当增大纳米 CBN 粒子含量达到 9.0% 时,“韧窝”形貌基本消失,断面由典型韧性断裂形貌又转变为脆性微观断裂形貌,如图 2f 所示。

2.3 纳米 CBN 含量对复合材料 T_g 的影响

不同纳米 CBN 含量的复合材料的 T_g 如图 3 所示。

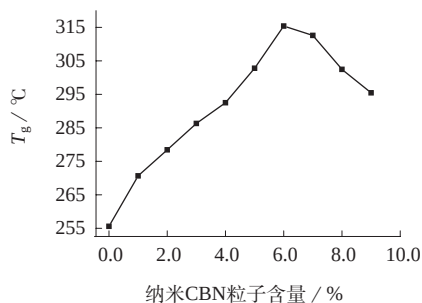


图 3 不同纳米 CBN 含量的复合材料的 T_g

T_g 决定了材料的温度使用上限。由图 3 可知,随着纳米 CBN 粒子含量的增加,复合材料的 T_g 呈现先增后减的趋势,但都比纯基体 CE 树脂的高,说明纳米 CBN 粒子的引入提高了复合材料的 T_g ,改善了复合材料的耐热性能。当纳米 CBN 含量为 6% 时,复合材料的 T_g 出现峰值,为 315.40°C,比纯 CE 树脂基体 (其 T_g 为 255.60°C) 提高了 23.40%。

复合材料 T_g 的升高,可以从两相间的交联密度和界面作用的变化对基体分子链段运动的影响来解释^[15]。高分子树脂基体内部的链段运动主要是分子链的内旋运动,而分子链的内旋运动与高分子链段的柔顺性和分子间的作用力有关。当纳米 CBN 粒子含量低于 6.0% 时,纳米粒子表面残键与基体树脂碳链上的活性点发生化学反应,产生键合,增大了基体碳链间的化学键交联密度,加强了基体分子碳链间作用力,限制了分子链段的内旋运动,减弱了基体分子链的柔顺性。其次,由于引发剂的引发作用,复合材料内部交联与共聚作用增强,两相间相容性、粘接作用进一步增强,界面作用加强,分子链段运动所需能量增大,复合材料的 T_g 升高,耐热性能得以改善。当第二相纳米 CBN 粒子含量高于 6.0% 时,由于纳米粒子由于表面残键较多,成键所需活化能低,固化过程中易发生粒子自身之间的软团聚现象^[12],软团聚的产生,造成第二相粒子粒径倍增,生成超出纳米材料级别的超细粉体,超细粉体主要以物理填充的方式存在于复合材料中。超细粉体由于

粒径较大,阻断了基体分子碳链之间的交联聚合,减弱了基体分子碳链间的交联密度,降低了基体分子碳链间作用力,增强了基体分子链的柔顺性,有利于基体分子链段的内旋运动。所以,当第二相 CBN 粒子质量分数高于 6.0% 时,复合材料的 T_g 出现下降趋势。

2.4 纳米 CBN 粒子含量对复合材料耐酸碱腐蚀性能的影响

不同纳米 CBN 粒子含量的复合材料酸、碱腐蚀率如图 4 所示。

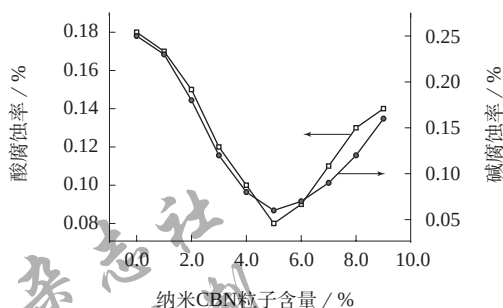


图 4 不同纳米 CBN 粒子含量的复合材料酸、碱腐蚀率

由图 4 可知,随纳米 CBN 粒子含量的增加,复合材料的酸、碱腐蚀率均呈现先降后增趋势。纯 CE 树脂基体的酸腐蚀率为 0.18%,碱腐蚀率为 0.25%。当纳米 CBN 粒子含量为 5.0% 时,复合材料的耐酸、碱性能最好,酸腐蚀率为 0.08%,比纯 CE 树脂基体降低了 55.6%;碱腐蚀率为 0.06%,比纯 CE 树脂基体降低 76.0%。

分析其原因,在纳米 CBN 粒子含量小于 5.0% 范围内,随着纳米 CBN 粒子含量的增加,复合材料的酸、碱腐蚀率均呈现下降趋势,说明复合材料的耐酸、碱腐蚀性能提高,原因在于^[10]: (1) 当纳米 CBN 粒子的含量小于 5% 时,纳米 CBN 粒子主要通过基体碳链上的活性点产生化学键合作用被引入,通过对基体交联密度的适当调整,有利于基体自身分子链的延长,使固化产物内未与主链聚合的短链分子减少。当在强酸、碱中浸泡时,短链分子与主碳链聚合完全,短链分子难以从主链中脱离,所以质量损耗小; (2) 当纳米 CBN 粒子含量大于 5% 时,复合材料中纳米 CBN 粒子含量过高,主要以物理填充形式进入复合材料,未与主分子链产生键合,一方面会阻断基体自身的交联聚合,使得碳链聚合不完全,基体碳链变短,短链分子在强酸、碱腐蚀作用下,容易从基体大分子链中脱离,造成复合材料质量损失;另一方面,以物理填充方式进入复合材料的纳米 CBN

粒子,因未与基体产生化学键合作用,在酸、碱浸泡过程中脱离基体,同样会造成质量损失,导致复合材料的酸、碱腐蚀率增大。

总体来说,复合材料中引入纳米 CBN 粒子后,其耐酸、碱腐蚀性能都优于纯 CE 基体,表明纳米 CBN 粒子的引入提高了复合材料的耐酸、碱腐蚀性能。

3 结论

制备了复合材料浇铸体型材,实验测试数据表明,在引发剂 BDTL 用量为 CE 树脂质量的 0.05% 时、EP 定量为 CE 树脂质量的 4.0% 时,复合材料的性能得到改善。

(1) 当纳米 CBN 粒子含量为 5.0% 时,复合材料的冲击强度和弯曲强度均达到最大值,分别为 15.92 kJ/m^2 和 165.47 MPa ,分别比基体树脂提高了 81.94% 和 95.82%。

(2) 当纳米 CBN 粒子含量为 6.0% 时,复合材料的 T_g 为 315.40°C ,比基体树脂提高了 23.40%。

(3) 当纳米 CBN 粒子含量为 5.0% 时,复合材料的耐酸、碱性能最好,酸腐蚀率为 0.08%,比纯基体降低了 55.6%;碱腐蚀率为 0.06%,比纯 CE 基体降低了 76.0%。

参考文献

- [1] 祝保林. 氰酸酯树脂性能研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2016:12-16.
- [2] 祝保林. 氰酸酯树脂应用研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2017:8-9.
- [3] Ma Jingjing, Zhan Maosheng, Wang Kai. Ultralight weight silver nanowires hybrid polyimide composite foams for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(1):563-576.
- [4] 祝保林, 周胜波, 刘森. CE/SEA-171 改性 SiC 复合材料的制备及性能研究 [J]. 热固性树脂, 2019, 34(2):6-13.
- [5] 赵凯, 高伟, 陈书华. 湿法缠绕成型 T700 碳纤维 / 氰酸酯树脂复合材料力学性能研究 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2019(2):91-95.
- [6] Ciupinski L, Kruszewski M, Grzonka J, et al. Design of interfacial Cr_3C_2 carbide layer via optimization of sintering parameters used to fabricate copper / diamond composites for thermal management applications[J]. Materials & Design, 2017, 120:170-185.
- [7] 敖辽辉. 石英纤维布 / J-284PD 氰酸酯树脂复合材料的制备与性能 [J]. 复合材料科学与工程, 2020(3):104-107.
- [8] 乔海涛, 包建文, 钟翔宇, 等. 氰酸酯树脂的改性及固化特性的热分析 [J]. 航空材料学报, 2019, 39(6):63-72.
- [9] 祝保林, 王君龙. PMMA / 纳米三氧化二硼复合材料的制备及性能 [J]. 工程塑料应用, 2017, 45(9):18-23.
- [10] 祝保林, 周胜波, 杨强. SiC 改性氰酸酯树脂 / 三甲氧基乙烯基硅烷材料的制备 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(10):44-50.
- [11] Prokopec R, Humer K, Maix R K, et al. Characterization of advanced cyanate ester / epoxy insulation systems before and after reactor irradiation[J]. Fusion Engineering and Design, 2010, 85(2):227-233.
- [12] Zhou Hui, Ye Qun, Xu Jianwei. Polyhedral oligomeric silsesquioxane-based hybrid materials and their applications[J]. Materials Chemistry Frontiers, 2017, 1(2):212-230.
- [13] 祝保林, 王君龙. Nd_2O_3 / ABS 复合材料的制备及性能 [J]. 热固性树脂, 2016, 31(3):56-60.
- [14] 祝保林. 钨掺杂二氧化钛 / 氰酸酯树脂基复合材料的研究 III : 耐热、摩擦与介电性能测试 [J]. 热固性树脂, 2016, 31(2):9-16.
- [15] 姚焕英, 祝保林, 周胜波. 氰酸酯树脂 / γ -硫丙基三甲氧基硅烷改性碳化硅复合材料的制备及性能研究 [J]. 化工新型材料, 2019, 47(11):77-82.