

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.01.022

$\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的制备及其对环氧树脂复合材料性能的影响

刘扬¹, 娄春华^{1,2}, 周永丽¹, 姜思雨¹

(1. 齐齐哈尔大学材料科学与工程学院, 黑龙江齐齐哈尔 161006; 2. 黑龙江省聚合物基复合材料重点实验室, 黑龙江齐齐哈尔 161006)

摘要:以尿素为原料采用热剥离法制备类石墨相氮化碳($\text{g-C}_3\text{N}_4$),经傅里叶变换红外光谱与 X 射线衍射共同证明目标产物制备成功。将 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 与环氧树脂 E51 混合制备多功能 E51/ $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (CNE) 复合材料。热重分析表明,与 E51 相比, CNE 复合材料的失重 10% 温度和失重 50% 温度以及残炭量增加,热稳定性提高。动态热机械分析测试表明, CNE 复合材料在室温的储能模量低于 E51,而玻璃化转变温度高于 E51。冲击性能测试表明, $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 质量分数为 3% 时, CNE 复合材料的冲击强度比 E51 提高了 43.5%。电导率测试表明, $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 质量分数为 4% 时,复合材料的电导率从 E51 的 3.7 S/cm 提高至 11.3 S/cm。微型燃烧量热测试表明,复合材料的热释放速率峰值较 E51 明显减小,阻燃性能提高。

关键词:类石墨相氮化碳; 环氧树脂; 热稳定性; 冲击性能; 导电性能; 燃烧性能

中图分类号: TQ323.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)01-0127-06

Preparation of $\text{g-C}_3\text{N}_4$ and Its Effect on Properties of Epoxy Composites

Liu Yang¹, Lou Chunhua^{1,2}, Zhou Yongli¹, Jiang Siyu¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China;

2. Heilongjiang Key Laboratory of Polymer Matrix Composites, Qiqihar 161006, China)

Abstract: Graphitic carbon nitride ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) was prepared using thermal exfoliation with urea as raw material. Fourier transform infrared spectroscopy and X-ray diffraction show that the objective product is successfully prepared. The multifunctional epoxy resin E51/ $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (CNE) composites were prepared by mixing $\text{g-C}_3\text{N}_4$ with E51. Thermogravimetric analysis shows that the thermal stabilities of the CNE composites are improved owing to the increase of the temperature of 10% weight loss, temperature of 50% weight loss and the amount of carbon residue. Dynamic thermomechanical analysis shows that the CNE composites have low storage modulus at room temperature and glass transition temperatures are higher than that of E51. Impact performance test shows that the impact strength of the CNE composite with 3wt% $\text{g-C}_3\text{N}_4$ is improved by 43.5% compared with that of E51. It is found that the electric conductivity of the CNE composite with 4wt% $\text{g-C}_3\text{N}_4$ increases from 3.7 S/cm of E51 to 11.3 S/cm through electric conductivity test. By micro combustion calorimetry, the flame retardancy of the CNE composites are improved because the peaks heat release rate of the composites are lower than that of E51.

Keywords: graphitic carbon nitride; epoxy resin; thermal stability; impact property; electric conductivity; combustion performance

环氧树脂是最常用的热固性树脂之一^[1-3]。环氧树脂具有低生产成本、易成型、高力学性能及固化收缩小、粘合性能好等优点,广泛应用于船舶涂料、汽车底漆、电子信息材料、航空领域、模压材料和生物医学等领域^[4-7]。但是纯环氧树脂也具有交联密

度高、易脆、冲击性能弱、耐热性差和阻燃性能低等缺点^[8-9]。因此,国内外学者通过各种方法对环氧树脂进行改性,希望得到综合性能较好的环氧树脂复合材料^[10]。

氮化碳(C_3N_4)是一种新型共价化合物,具有 5

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(E2018058),黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目(CLKFKT2021B8, 135309437)

通信作者: 娄春华,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为高分子材料的合成与改性

收稿日期: 2021-11-02

引用格式: 刘扬,娄春华,周永丽,等. $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的制备及其对环氧树脂复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(1):127-132.

Liu Yang, Lou Chunhua, Zhou Yongli, et al. Preparation of $\text{g-C}_3\text{N}_4$ and its effect on properties of epoxy composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(1):127-132.

种结构,即 α 相、 β 相、准立方相、立方相以及类石墨相,类石墨相是其中唯一的软质相,其它相对应材料均为可以和金刚石媲美的超硬材料。近年来,类石墨相 C_3N_4 ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) 由于具有优异的电学、热学、力学和光学特性,在改善聚合物性能上有着巨大的应用价值。作为一种 sp^2 杂化连接的半导体材料, $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 具有载流子迁移率较高、结构稳定、热导率高和光生电子-空穴复合率低等优点,应用前景十分广阔^[11]。 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 具有类似于石墨的层状结构,所以层间范德华相互作用较小^[12]。因此 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 可以与聚合物基体有较好的相容性,通过物理或化学结合可形成强的界面作用,具有很好的热稳定性和化学稳定性。樊义翰^[13]以三聚氰胺为原料制备了 $\text{g-C}_3\text{N}_4$,并与环氧树脂复合制备环氧树脂/ $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 复合材料,发现复合材料的导热性能和绝缘性能高于纯环氧树脂。Wang等^[14]探究了 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 增强环氧树脂 (HT-723A) 的力学性能,发现加入 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 后材料的力学性能显著提高。Shi等^[15]研究了 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 纳米片对生物高分子海藻酸钠薄膜热稳定性和力学性能的影响,发现薄膜的初始热降解温度提高,拉伸弹性模量也显著提高。但目前在 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 改善环氧树脂纳米复合材料电导率、燃烧性能等方面的相关研究文献较少。

为了利用 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的诸多优点以提高环氧树脂的各方面性能,笔者首先以尿素为原料,采用热剥离法制备了 $\text{g-C}_3\text{N}_4$,然后将其与环氧树脂混合制备了具有多种优异性能的环氧树脂/ $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 复合材料,综合分析了复合材料的热稳定性、动态力学性能、燃烧性能和导电性能,发现 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 可作为一种新型的填料,使环氧树脂复合材料具有优越的性能,这为高性能环氧树脂复合材料的制备提供了新的途径。

1 实验部分

1.1 主要原料

环氧树脂 E51 : CYD-218,工业级,中国石化集团资产经营管理有限公司巴陵石化分公司;

双氰胺 (DCD) : 纯度 99%,阿拉丁试剂 (上海) 有限公司;

2-甲基咪唑 (2-MI) : 纯度 98%,阿拉丁试剂 (上海) 有限公司;

尿素: 纯度 $\geq 46.4\%$,内蒙古乌拉山化肥厂有限公司。

1.2 主要仪器与设备

陶瓷纤维马弗炉: FP-40 型,北京市永光明医疗

仪器厂;

塑料材料动态性能试验机: GT-7045-HMH 型,高铁检测仪器 (东莞) 有限公司;

在线傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 光纤检测系统: Frontier 型,美国 Perkin Elmer 公司;

X 射线衍射 (XRD) 仪: XRD 7000 型,日本 Shimadzu 公司;

真空干燥箱: DZF-6090 型,上海精宏实验设备有限公司;

双电测四探针测试仪: RTS-5 型,广州四探针科技有限公司;

热重 (TG) 分析仪: TGA5500,美国 Waters 公司;

动态热机械分析 (DMA) 仪: DMA Q800 型,美国 TA 公司;

微型燃烧量热仪: FTT0001-11311 型,英国 FTT 公司。

1.3 试样制备

(1) $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的制备。

按质量比 3 : 5 称取尿素与蒸馏水,配成混合溶液。将混合溶液倒入陶瓷坩埚中密封放入马弗炉中,以 $15^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率先加热到 400°C 保温 1 h 后,再加热至 530°C 保温 2.5 h,然后冷却至室温。将制得的淡黄色疏松块体溶于蒸馏水中超声 1 h,然后放入干燥箱中烘干,取出研磨得到 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 粉末。

(2) E51/ $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (CNE) 复合材料的制备。

按质量比 100 : 0.5 : 8 称取 E51, 2-MI 和 DCD, 搅拌混合均匀,添加不同含量的 $\text{g-C}_3\text{N}_4$, 搅拌混合均匀后,置于真空干燥箱内 (40°C) 脱泡 0.5 h, 得到 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 质量分数为 0%, 1%, 2%, 3%, 4% 的 CNE 复合材料 (分别编号为 CNE0, CNE1, CNE2, CNE3, CNE4), 将复合材料转移至固化模具中,在 130°C 下固化 2 h, 然后冷却至室温,脱模得到固化样条。

1.4 测试与表征

(1) FTIR 分析。

分析前将少量 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 样品通过溴化钾压片制样,分析时采用的波数范围为 $500 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ 。

(2) XRD 分析。

扫描步径为 0.01° ,扫描范围为 $5^\circ \sim 80^\circ$ 。

(3) 冲击性能测试。

复合材料无缺口冲击强度按照 GB/T 1043-2008 测试。

(4) TG 分析。

使用电子天平准确称量 $6 \sim 10 \text{ mg}$ 复合材料样

品,置于样品池中, N₂ 气氛,从室温升温至 600 ℃,升温速率为 10 ℃ /min。

(5) 动态力学性能测试。

采用单悬梁模式,试样尺寸为 35 mm × 10 mm × 3.5 mm,空气氛围,从室温升温至 200 ℃,升温速率为 5 ℃ /min,频率为 1 Hz。

(6) 电导率测试。

取固定质量复合材料的粉末,用压片机压制成规则的圆形薄片,按照 GB/T 11007-2008 测试电导率。

(7) 微型燃烧量热分析。

使用电子天平准确称量 4 ~ 6 mg 复合材料样品,放入坩埚中,将坩埚置于微型燃烧量热仪的坩埚底座上, N₂ 和 O₂ 混合气氛,从室温升温至 900 ℃,升温速率 1 ℃ /s。

2 结果与讨论

2.1 g-C₃N₄ 结构表征

(1) FTIR 分析。

图 1 是 g-C₃N₄ 的 FTIR 谱图。图 1 中,位于 3 177 ~ 3 302 cm⁻¹ 处的宽吸收峰归属于 N—H 键的伸缩振动和氢键作用;位于 1 240 ~ 1 634 cm⁻¹ 范围内的吸收峰归属于 C—N 芳香环的骨架振动;位于 811 cm⁻¹ 处的吸收峰是 g-C₃N₄ 的特征吸收峰,属于三嗪环结构的振动峰。

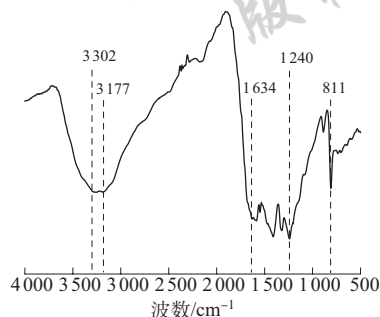


图 1 g-C₃N₄ 的 FTIR 谱图

(2) XRD 分析。

图 2 为 g-C₃N₄ 的 XRD 谱图。从图 2 可以看出,在 2θ 值为 13.3° 和 27.4° 处有明显的衍射峰,符合 C₃N₄ 的特征峰(JCPDS 87-1526)所在位置^[16],表明样品具有 g-C₃N₄ 的结构组成。其中 27.4° 处的特征峰的强度最强,属于 g-C₃N₄ 的(002) 衍射面,是 g-C₃N₄ 芳香环系统的层间堆垛峰。而 13.3° 处的特征峰属于 g-C₃N₄ 的(100) 衍射面,与组成 g-C₃N₄ 的氮碳杂环单元形成的层内孔间距离相对应。

通过 FTIR 和 XRD 分析,说明采用热剥离法成

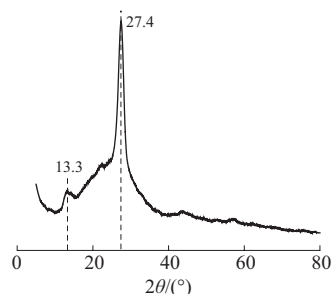


图 2 g-C₃N₄ 的 XRD 谱图

功制备了 g-C₃N₄。

2.2 热稳定性分析

不同 g-C₃N₄ 含量的 CNE 复合材料 TG 曲线如图 3 所示。图 3 中温度开始升高时质量保持率即略微降低,这是因为样品中的微量水挥发导致的,而后在 300 ~ 450 ℃,质量保持率随温度升高而迅速下降,样品出现了热失重台阶,这是因为复合材料发生了热分解反应^[17-18]。

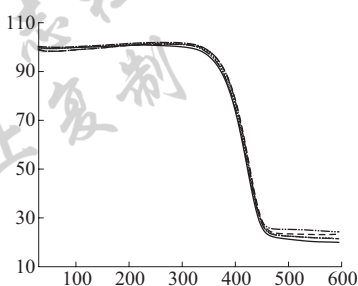


图 3 不同 g-C₃N₄ 含量的 CNE 复合材料的 TG 曲线

一般认为失重 10% 温度 (T_{initial}) 和失重 50% 温度 (T_{half}) 是热稳定性的指标,不同 g-C₃N₄ 含量的 CNE 复合材料 T_{initial} 及 T_{half} 见表 1。由表 1 可知,复合材料的 T_{initial} 和 T_{half} 相较 E51 均增大,说明与 E51 相比,复合材料的热稳定性明显提高。其中 CNE1 的 T_{initial} 和 T_{half} 最高,为 381.1 ℃ 和 427.8 ℃,比 E51 提高约 8.0 ℃ 和 4.9 ℃。复合材料的热分解温度提高是因为 g-C₃N₄ 的热导率比 E51 的高,且热分解温度也高于 E51,所以复合材料的热稳定性提高^[19]。随着 g-C₃N₄ 含量增大,复合材料的热分解温度逐渐下降,这可能是由 g-C₃N₄ 在 E51 中的分散情况变差,体系黏度增加导致的。

由图 3 可看出, CNE 复合材料燃烧后的残炭量

表 1 不同 g-C₃N₄ 含量的 CNE 复合材料的 T_{initial} 和 T_{half} / ℃

复合材料编号	T_{initial}	T_{half}
CNE0	373.1	422.9
CNE1	381.1	427.8
CNE2	380.4	426.7
CNE3	377.5	425.9
CNE4	375.8	424.2

高于E51。残炭量增加是因为 $g-C_3N_4$ 会在E51中形成一层炭层,起到一定的保护和隔热的作用,使热稳定性提高。同时,较高的热稳定性对提高复合材料在燃烧过程中的阻燃性能也有积极的影响。

2.3 动态力学性能分析

储能模量是指黏弹性材料在交变应力作用下存储弹性变形能量的能力,是材料变形回弹的一种指标^[14]。图4为不同 $g-C_3N_4$ 含量的CNE复合材料的储能模量。由图4可以看出,CNE复合材料的初始储能模量明显比E51低,储能模量的降低表明加入 $g-C_3N_4$ 后E51由刚性材料向柔性材料转变。并且随着 $g-C_3N_4$ 含量增加,CNE复合材料的储能模量呈先降低后升高的趋势;随温度的升高,E51的储能模量降低速度加快,CNE复合材料的储能模量逐渐高于E51。

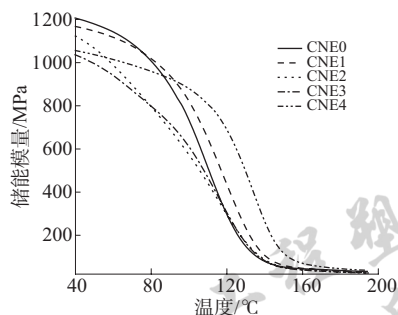


图4 不同 $g-C_3N_4$ 含量的CNE复合材料的储能模量

图5是通过DMA测试得到的不同 $g-C_3N_4$ 含量的CNE复合材料损耗因子($\tan\delta$),用来衡量材料储存的弹性能与振动时消耗的能量关系^[20]。由图5可以看到,E51有一个很宽的峰,CNE复合材料峰宽变窄,该峰的起始和终止处所对应的温度分别代表了材料的玻璃化转变过程的开始和结束,峰顶处表示玻璃化转变过程最剧烈。取 $\tan\delta$ 曲线峰峰顶对应温度为CNE复合材料的玻璃化转变温度(T_g)。可以发现, $g-C_3N_4$ 的加入使曲线峰顶向高温区间移动,CNE复合材料的 T_g 高于E51,CNE4

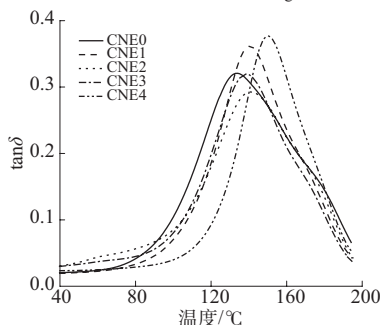


图5 不同 $g-C_3N_4$ 含量的CNE复合材料的 $\tan\delta$

的 T_g 最高。

2.4 冲击性能分析

图6为不同 $g-C_3N_4$ 含量的CNE复合材料的冲击强度。从图6可以看出,CNE复合材料的冲击强度明显高于E51,并且随着 $g-C_3N_4$ 含量增加呈现先增大后减小的趋势。当 $g-C_3N_4$ 质量分数为3%时CNE3的韧性更好,冲击强度最大为 2.64 kJ/m^2 ,比E51提高了43.5%。这是因为当复合材料受到外力作用时,由于 $g-C_3N_4$ 与E51有良好的界面结合,所以受到的应力会通过结合点传递给 $g-C_3N_4$,分散了E51所受到的应力,故提高了复合材料的冲击强度。但当 $g-C_3N_4$ 质量分数增加到4%时冲击强度略微降低,为 2.54 kJ/m^2 ,这是由于 $g-C_3N_4$ 含量增加,在E51中可能发生团聚导致了应力集中。

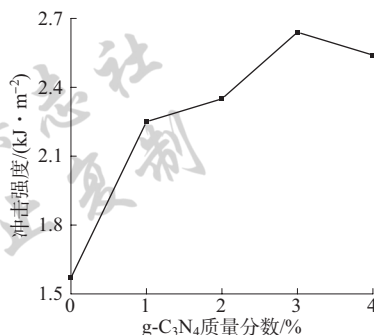


图6 不同 $g-C_3N_4$ 含量的CNE复合材料的冲击强度

2.5 导电性能分析

图7为不同 $g-C_3N_4$ 含量的CNE复合材料的电导率。由图7可知,CNE复合材料的电导率随 $g-C_3N_4$ 含量的增加而增加。对于该复合材料, $g-C_3N_4$ 质量分数为0%~1%的区间为 $g-C_3N_4$ 含量的逾渗转变区,在此过程 $g-C_3N_4$ 与E51界面接触逐渐密切,当 $g-C_3N_4$ 质量分数达到1%(逾渗阈值)后,复合材料的电导率突增,这是因为在此含量下,完整的导电网络基本搭建成功,导电粒子的电子输运稳定。随着 $g-C_3N_4$ 含量的增加,复合材料电导率也

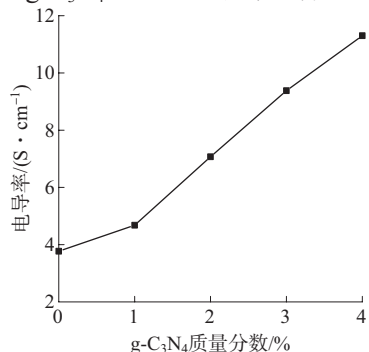


图7 不同 $g-C_3N_4$ 含量的CNE复合材料的电导率

在逐渐增加,在 $g-C_3N_4$ 质量分数为 4% 时,复合材料的电导率最大,从未加入 $g-C_3N_4$ 的 3.7 S/cm 提高至 11.3 S/cm,复合材料电导率的变化趋势符合导电逾渗现象^[18]。当 $g-C_3N_4$ 质量分数低于 1% 时, $g-C_3N_4$ 不能形成相互连续接触的网状组织,但复合材料仍具有一定的电导率,这是基于隧道效应传导机理形成的导电效应^[21]。

2.6 燃烧性能

热释放速率 (HRR) 曲线指在规定的试验条件下,在单位时间内材料燃烧所释放的热量, HRR 峰值越大材料的阻燃性能越弱,阻燃效果越差。图 8 为不同 $g-C_3N_4$ 含量的 CNE 复合材料的 HRR 曲线。由图 8 可以看出, $g-C_3N_4$ 的存在改变了 E51 的燃烧行为,与 E51 相比 CNE 复合材料的 HRR 峰值明显变小,阻燃性能更好。其阻燃机理为 $g-C_3N_4$ 的层状结构起到了凝聚相阻燃的效果,使氧气及热量被阻挡在外不易进入底部材料中, E51 的热分解缓慢,所以提高了阻燃的效果^[22-23]。另外,可以看出,各 CNE 复合材料的 HRR 峰值相差不大,表明添加 $g-C_3N_4$ 后,其含量变化对复合材料阻燃效果的影响很小。

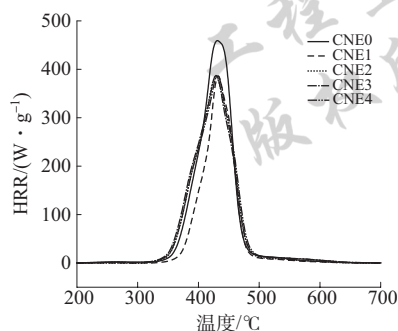


图 8 不同 $g-C_3N_4$ 含量的 CNE 复合材料 HRR 曲线

3 结论

(1) 以尿素与蒸馏水为原料采用热剥离法制备 $g-C_3N_4$ 。通过 FTIR 和 XRD 分析验证 $g-C_3N_4$ 制备成功。

(2) 热稳定性分析表明,加入 $g-C_3N_4$ 后,环氧树脂的热稳定性得到了提升。动力学性能分析表明,加入 $g-C_3N_4$ 后,环氧树脂由刚性材料向柔性材料转变,并且 T_g 升高。

(3) CNE 复合材料的冲击强度明显高于纯环氧树脂, $g-C_3N_4$ 质量分数为 3% 时,复合材料的冲击强度相对纯环氧树脂提高了 43.5%。

(4) 电导率测试表明, $g-C_3N_4$ 的加入提高了 CNE 复合材料的导电性能, $g-C_3N_4$ 含量越高复合材料的

导电能力越强, CNE 复合材料的电导率从未加入 $g-C_3N_4$ 的 3.7 S/cm 提高至 $g-C_3N_4$ 质量分数为 4% 时的 11.3 S/cm。

(5) 燃烧性能测试表明,由于 $g-C_3N_4$ 的加入形成阻隔层和残炭层,所以 CNE 复合材料 HRR 峰值变小,阻燃性能更优。

参考文献

- [1] Zhu Jiahua, Chen Minjiao, He Qingliang, et al. An overview of the engineered graphene nanostructures and nanocomposites[J]. RSC Advances, 2013, 3(45):22 790–22 824.
- [2] Gu Hongbo, Tadakamalla S, Zhang Xi, et al. Epoxy resin nanosuspensions and reinforced nanocomposites from polyaniline stabilized multi-walled carbon nanotubes[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2013, 1(4):729–743.
- [3] Jiao Chuanmei, Dong Juan, Zhang Chongjie, et al. Synthesis and properties of a phosphate ester as curing agent in an epoxy resin system[J]. Iranian Polymer Journal, 2014, 23(8):591–598.
- [4] Blanco I, Oliveri L, Cicala G, et al. Effects of novel reactive toughening agent on thermal stability of epoxy resin[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2012, 108(2):685–693.
- [5] Zhang Xi, Alloul O, Zhu Jiahua, et al. Iron-core carbon-shell nanoparticles reinforced electrically conductive magnetic epoxy resin nanocomposites with reduced flammability[J]. RSC Advances, 2013, 3(24):9 453–9 464.
- [6] Zhang Xi, He Qingliang, Gu Hongbo, et al. Polyaniline stabilized barium titanate nanoparticles reinforced epoxy nanocomposites with high dielectric permittivity and reduced flammability[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2013, 1(16):2 886–2 899.
- [7] Zhu Jiahua, Wei Suying, Yadav A, et al. Rheological behaviors and electrical conductivity of epoxy resin nanocomposites suspended with in-situ stabilized carbon nanofibers[J]. Polymer, 2010, 51(12):2 643–2 651.
- [8] Hayaty M, Honarkar H, Beheshty M H. Curing behavior of dicyandiamide/epoxy resin system using different accelerators[J]. Iranian Polymer Journal, 2013, 22(8):591–598.
- [9] Jiao Chuanmei, Dong Juan, Chen Xilei, et al. Influence of T31 content on combustion and thermal degradation behaviors on flame-retardant epoxy composites[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2013, 114(3):1 201–1 206.
- [10] 李丽丽,李青,肖文刚,等. 石墨烯/环氧树脂纳米复合材料的研究进展[J]. 复合材料科学与工程, 2021(5):110–119.
Li Lili, Li Qing, Xiao Wengang, et al. Research progress in graphene/epoxy resin nanocomposites[J]. Composites Science and Engineering, 2021(5):110–119.
- [11] 李俊怡,梁峰,田亮,等. 类石墨相氮化碳纳米片的制备研究进展[J]. 化学通报, 2018, 81(5):387–393.
Li Junyi, Liang Feng, Tian Liang, et al. Progress in preparation

- method of g-C₃N₄ nanosheets[J]. Chemistry, 2018, 81(5):387–393.
- [12] He Zhiqiao, Wang Danfen, Tang Juntao, et al. A quasi-hexagonal prism-shaped carbon nitride for photoreduction of carbon dioxide under visible light[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(9):8 219–8 229.
- [13] 樊义翰. 还原氧化石墨烯 @ 氮化碳 / 环氧树脂复合材料的制备及性能研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
- Fan Yihan. Study on preparation and properties of reduced graphene oxide @carbon nitride/epoxy resin composites[D]. Guangzhou:Guangdong University of Technology, 2018.
- [14] Wang T T, Song B, Wang L. A new filler for epoxy resin:Study on the properties of graphite carbon nitride (g-C₃N₄) reinforced epoxy resin composites[J]. Polymers, 2020, 12(1). DOI:10.3390/polym12010076.
- [15] Shi Y Q, Jiang S H, Zhou K Q, et al. Influence of g-C₃N₄ nanosheets on thermal stability and mechanical properties of biopolymer electrolyte nanocomposite films:A novel investigation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(1):429–437.
- [16] Akhundi A, García-López E I, Marci G, et al. Comparison between preparative methodologies of nanostructured carbon nitride and their use as selective photocatalysts in water suspension[J]. Research on Chemical Intermediates, 2017, 43(9):5 153–5 168.
- [17] 王安琪. 环氧树脂基纳米复合材料的制备及其性能分析 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
- Wang Anqi. Preparation and properties of epoxy resin matrix nanocomposites[D]. Qin Huangdao:Yanshan University, 2020.
- [18] 董宁. 碳纳米管 / 环氧树脂复合材料的制备及其物理性能研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
- Dong Ning. Performance research on the preparation and the physical properties of carbon nanotubes/epoxy composite[D]. Tian Jin:Tianjin University, 2008.
- [19] Ye Y S, Yen Y C, Cheng C C, et al. Polytriazole/clay nanocomposites synthesized using in situ polymerization and click chemistry[J]. Polymer, 2010, 51(2):430–436.
- [20] 李拯. 氧化石墨烯 / 环氧树脂复合材料的界面改性与性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- Li Zheng. Study on interface and properties of graphene oxide/epoxy composites[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2013.
- [21] 朱巧思, 郭建强, 李炯利, 等. 制备工艺对石墨纳米片 / 环氧树脂复合材料电导率的影响 [J]. 功能材料, 2021, 52(5):5 181–5 187.
- Zhu Qiaosi, Guo Jianqiang, Li Jiongli, et al. Effect of preparation process on electrical conductivity of graphite nanosheet/epoxy resin composites[J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(5):5 181–5 187.
- [22] Wu Kun, Shen Minmin, Hu Yuan, et al. Thermal degradation and intumescent flame retardation of cellulose whisker/epoxy resin composite[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2011, 104(3):1 083–1 090.
- [23] 孙悦, 冷洋, 许苗军, 等. 导热阻燃环氧树脂材料的制备及性能研究 [J]. 化学与粘合, 2021, 43(3):197–199.
- Shun Yue, Leng Yang, Xu Miaojun, et al. Study on the preparation and properties of thermal conductive and flame retardant epoxy resin[J]. Chemistry and Adhesion, 2021, 43(3):197–199.