

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.05.026

碳纳米管含量对聚酰亚胺/碳纤维复合材料性能的影响

于广¹, 魏化震¹, 李大勇¹, 高守臻¹, 罗长宏¹, 马开宝¹, 王晓立¹, 宋爱琪², 成毕勤²

(1. 山东非金属材料研究所, 济南 250031; 2. 山东正元地球物理信息技术有限公司, 济南 250101)

摘要:以聚酰亚胺(PI)为基体、碳纤维(CF)和碳纳米管(CNTs)为复合增强体,采用热模压工艺制备了不同CNTs含量的PI/CF/CNTs复合材料。采用电子拉力机、动态热机械分析仪和热重分析仪研究了PI/CF/CNTs复合材料的力学性能、动态力学性能和热稳定性。结果表明,与未加CNTs的PI/CF复合材料相比,CNTs含量为PI质量的0.2%时,PI/CF/CNTs复合材料具有最佳的常温力学性能,其中常温拉伸强度提高19.5%,常温弯曲强度提高20.6%,常温层间剪切强度提高14.7%,玻璃化转变温度则由357℃提高到451℃;CNTs含量为PI质量的0.05%时,PI/CF/CNTs复合材料具有最佳的高温力学性能,其中400℃拉伸强度提高15.8%,400℃弯曲强度提高9.6%,400℃层间剪切强度提高12.8%。CNTs的添加对PI/CF/CNTs复合材料的热稳定性几乎没有影响。

关键词:碳纳米管;聚酰亚胺;碳纤维;复合材料;耐高温性能

中图分类号: TQ323.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)05-0143-06

Effects of Carbon Nanotube Content on Properties of Polyimide/Carbon Fiber Composites

Yu Guang¹, Wei Huazhen¹, Li Dayong¹, Gao Shouzhen¹, Luo Changhong¹, Ma Kaibao¹, Wang Xiaoli¹, Song Aiqi², Cheng Biqin²

(1. Shandong Institute of Non-metallic Materials, Jinan 250031, China;

2. Shandong Zhengyuan Geophysical Information Technology Co. Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: Taking polyimide (PI) as matrix, carbon fiber (CF) and carbon nanotubes (CNTs) as composite reinforcement, PI/CF/CNTs composites with different CNTs contents were prepared by hot-molding process. The mechanical properties, dynamic thermomechanical properties and thermal stability of PI/CF/CNTs composites were studied by using electronic tensile machine, dynamic thermomechanical analyzer and thermogravimetric analyzer. The results show that compared with PI/CF composites without CNTs, when the CNTs content is 0.2% of PI mass, the PI/CF/CNTs composite has the best mechanical properties at room temperature, the tensile strength and flexural strength at room temperature are increased by 19.5% and 20.6% respectively, the interlaminar shear strength at room temperature is increased by 14.7%, the glass transition temperature is increased from 357℃ to 451℃. When the CNTs content is 0.05% of PI mass, the PI/CF/CNTs composite has the best high-temperature mechanical properties, the tensile strength and flexural strength at 400℃ are increased by 15.8% and 9.6% respectively, and the interlaminar shear strength at 400℃ is increased by 12.8%. The addition of CNTs has almost no effect on the thermal stability of PI/CF/CNTs composites.

Keywords: carbon nanotubes; polyimide; carbon fiber; composite; high temperature resistance

聚酰亚胺(PI)具有优异的介电性能和耐高温性能,在电子器件、耐高温承载结构等军民两用领域都具有广泛的应用^[1-3]。碳纤维(CF)具有极高的比强度和比弹性模量,在运动器材、车辆工程、清洁能源、航空航天等领域具有广泛的应用^[4]。CF可以极大地提高PI的力学性能,因此PI/CF复合材料可应用于弹翼、发动机外涵道、导弹壳体等领域^[5]。随

着飞行器的进一步发展,其速度越来越快,结构功能件面临的工况环境也更加恶劣,因此对材料的力学性能、耐高温性能等提出了更高的要求。

碳纳米管(CNTs)在1991年由S. Iijima^[6]首次发现,从那以后,大量的科研工作者加入到CNTs的研究队伍中,随着对CNTs的研究越来越深入广泛,人们发现,CNTs具有极高的力学性能^[7],同时具有

通讯作者:李大勇,硕士,研究员,主要研究方向为非金属复合材料技术 E-mail: 15965639188@163.com

收稿日期: 2020-03-18

引用格式: 于广,魏化震,李大勇,等. 碳纳米管含量对聚酰亚胺/碳纤维复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(5): 143-148.

Yu Guang, Wei Huazhen, Li Dayong, et al. Effects of carbon nanotube content on properties of polyimide / carbon fiber composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(5): 143-148.

突出的热性能和电性能^[8],将微量的CNTs与树脂复合后即可显著提高树脂的力学性能和电性能,因此CNTs成为了一种优异的增强体材料^[9-12]。如果将CNTs与CF同时用于增强PI,这样一种一维与二维联合的多尺度增强体有可能进一步提高复合材料的力学性能、耐高温性能等,但对于这一方面的研究尚未见报道,目前的研究主要集中在CNTs增强PI薄膜的力学性能、电性能上^[13-15]。

因此为了进一步提高PI/CF复合材料的力学性能和耐高温性能,笔者通过超声分散的方法将CNTs均匀地分散在PI树脂中,通过模压成型工艺制备了具有不同CNTs含量的PI/CF/CNTs复合材料,研究CNTs含量的变化对PI/CF/CNTs复合材料常温力学性能、高温力学性能、动态力学性能和热稳定性的影响规律,为PI/CF/CNTs复合材料的制备及应用提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

CNTs: CNT103, 直径8~15 nm, 长度50 μm , 纯度大于95%, 北京德科岛金科技有限公司;

T800 CF平纹布: 威海拓展纤维有限公司;

热固性PI树脂: 苯炔基封端, 中国科学院北京化学研究所。

1.2 主要仪器及设备

超声分散仪: RX-70型, 宁波新芝生物科技股份有限公司;

分析天平: ME204型, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;

高温压机: P-V-50-3RT-PCD型, 磐石油压工业(安徽)有限公司;

电子万能实验机: RGT-10A型, 深圳市瑞格尔仪器有限公司;

动态热机械分析(DMA)仪: NETZSCH 242C型, 德国耐驰集团;

热重(TG)分析仪: STA449型, 德国耐驰集团;

超景深三维显微镜: smartzoom5型, 蔡司股份公司。

1.3 试样制备

(1) 预浸料的制备。

将CNTs用分析天平准确称量后加入到PI乙醇溶液中, PI乙醇溶液的树脂质量分数为53%, CNTs含量为PI树脂质量的百分数。然后将加有CNTs的PI乙醇溶液放入超声分散仪中超声分散

60 min, 程序设置为40 kHz/10 min $\rightarrow$ 25 kHz/10 min $\rightarrow$ 40 kHz/10 min $\rightarrow$ 25 kHz/10 min $\rightarrow$ 40 kHz/10 min $\rightarrow$ 25 kHz/10 min, 然后利用刮胶板将超声分散均匀的混合液均匀地刮在CF织物上, CF与PI树脂的质量比为60:40, 室温下放置7 d, 然后裁成250 mm $\times$ 250 mm大小。

(2) PI/CF/CNTs复合材料制备。

将(1)中裁好的预浸料铺放至模具中, 连续铺12层, 然后利用高温压机按照100 $^{\circ}\text{C}$ /60 min $\rightarrow$ 140 $^{\circ}\text{C}$ /60 min $\rightarrow$ 180 $^{\circ}\text{C}$ /60 min $\rightarrow$ 220 $^{\circ}\text{C}$ /60 min $\rightarrow$ 260 $^{\circ}\text{C}$ /30 min (0.5 MPa) $\rightarrow$ 300 $^{\circ}\text{C}$ /30 min (2 MPa) $\rightarrow$ 370 $^{\circ}\text{C}$ /60 min (2 MPa)的固化制度完成复合材料的固化成型。

(3) PI/CF复合材料的制备。

将不含CNTs的PI乙醇溶液均匀地浸渍在CF织物上, CF与PI树脂的质量比为60:40, 室温下放置7 d, 裁成250 mm $\times$ 250 mm大小, 然后在模具中铺层, 最后采用(2)中相同的固化制度完成复合材料的固化成型。

1.4 测试与表征

(1) 常温力学性能测试。

拉伸性能按GB/T 1447-2005测试, 拉伸强度测试的加载速度为10 mm/min, 拉伸弹性模量测试的加载速度为2 mm/min;

弯曲性能按GB/T 1449-2005测试, 弯曲强度测试的加载速度为10 mm/min, 弯曲弹性模量测试的加载速度为2 mm/min;

层间剪切强度按JC/T 773-2010测试, 加载速度为1 mm/min。

(2) 高温力学性能测试。

高温拉伸性能、高温弯曲性能和高温层间剪切强度的测试是在带有加热炉的设备上完成的, 试样在400 $^{\circ}\text{C}$ 下保温30 min后再进行性能测试, 试样的尺寸以及加载速度与相对应的常温力学性能相同。

(3) 动态力学性能测试。

采用DMA仪测试试样的动态力学性能, 试样尺寸为60 mm $\times$ 5 mm $\times$ 2 mm, 单悬臂模式, 升温速率为3 $^{\circ}\text{C}$ /min, 频率为1 Hz。

(4) 热稳定性测试。

采用TG分析仪测试试样的热稳定性, 升温速率10 $^{\circ}\text{C}$ /min, 氮气气氛。

(5) 微观形貌表征。

利用超景深三维显微镜观察常温弯曲性能测

试后试样表面的破坏形貌。

2 结果与讨论

2.1 CNTs 含量对 PI/CF/CNTs 复合材料常温力学性能的影响

图 1 为不同 CNTs 含量的 PI/CF/CNTs 复合材料的常温拉伸强度和拉伸弹性模量。由图 1 可以看出,随着 CNTs 含量的增加,PI/CF/CNTs 复合材料的常温拉伸强度、拉伸弹性模量均先升高后降低。CNTs 的含量为 0.2% 时,拉伸强度达到最大,相比于 PI/CF 复合材料,其拉伸强度由 601 MPa 提高到 718 MPa,提高了 19.5%。CNTs 的含量为 0.1% 时,拉伸弹性模量达到最大,相比于 PI/CF 复合材料,其拉伸弹性模量由 90.4 GPa 提高到 99.5 GPa,提高了 10.1%。另外也可以看到,当 CNTs 的含量达到 0.5% 时,PI/CF/CNTs 复合材料的常温拉伸强度低于 PI/CF 复合材料,当 CNTs 的含量大于 0.2% 时,PI/CF/CNTs 复合材料的常温拉伸弹性模量低于 PI/CF 复合材料。

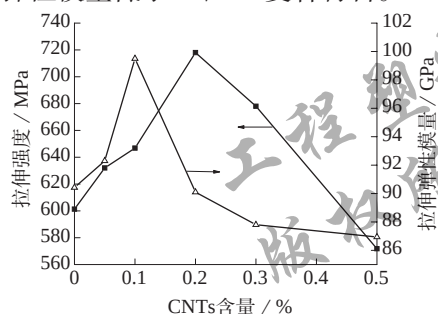


图 1 不同 CNTs 含量的 PI/CF/CNTs 复合材料的常温拉伸性能

图 2 是不同 CNTs 含量的 PI/CF/CNTs 复合材料的常温弯曲强度和弯曲弹性模量。由图 2 可以看出,随着 CNTs 含量的提高,PI/CF/CNTs 复合材料的常温弯曲强度和弯曲弹性模量都先升高后降低,CNTs 的含量为 0.2% 时,PI/CF/CNTs 复合材料的弯曲强度达到最大值,相较于 PI/CF 复合材料,常温弯曲强度由 820 MPa 提高到 989 MPa,提高了 20.6%。当 CNTs 的含量为 0.05% 时,PI/CF/CNTs 复合材料的常温弯曲弹性模量达到最大,相较于 PI/CF 复合材料,常温弯曲弹性模量由 67.1 GPa 提高到 82.8 GPa,提高了 23.4%。另外,当 CNTs 的含量达到 0.5% 时,PI/CF/CNTs 复合材料的常温弯曲强度略低于 PI/CF 复合材料。

图 3 是不同 CNTs 含量的 PI/CF/CNTs 复合材料的常温层间剪切强度。由图 3 可以看到,随着 CNTs 含量的提高,PI/CF/CNTs 复合材料的常温

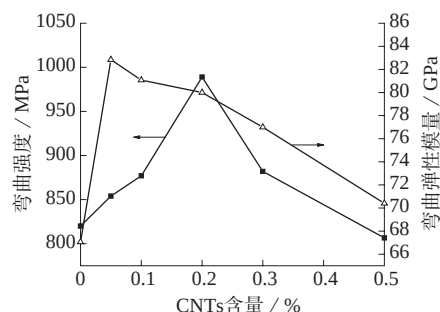


图 2 不同 CNTs 含量的 PI/CF/CNTs 复合材料的常温弯曲性能

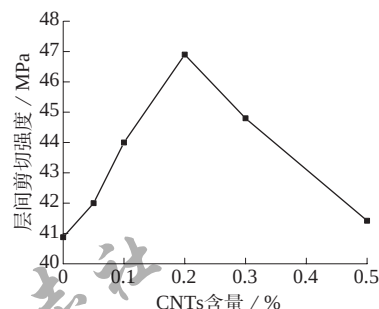


图 3 不同 CNTs 含量的 PI/CF/CNTs 复合材料的常温层间剪切强度
层间剪切强度先升高后降低,其中,当 CNTs 的含量为 0.2% 时,PI/CF/CNTs 复合材料的常温层间剪切强度达到最大,相较于 PI/CF 复合材料,其常温层间剪切强度由 40.9 MPa 提高到 46.9 MPa,提高了 14.7%。

从图 1~图 3 可以看出,添加 CNTs 对于 PI/CF/CNTs 复合材料的常温力学性能具有相同的影响趋势,即随着 CNTs 含量提高,PI/CF/CNTs 复合材料的常温力学性能先升高后降低;CNTs 含量为 0.2% 时,PI/CF/CNTs 复合材料的常温拉伸强度、常温弯曲强度、常温层间剪切强度都达到最大。

2.2 CNTs 含量对 PI/CF/CNTs 复合材料高温力学性能的影响

图 4 为不同 CNTs 含量的 PI/CF/CNTs 复合材料的高温拉伸性能。从图 4 可以看到,随着 CNTs 含量的增加,PI/CF/CNTs 复合材料的高温拉伸强度先升高后降低,高温拉伸弹性模量先降低后升高。CNTs 含量为 0.05% 时,PI/CF/CNTs 复合材料的高温拉伸强度达到最大值,相较于 PI/CF 复合材料,高温拉伸强度由 478 MPa 提高到 552 MPa,提高了 15.8%。当 CNTs 的含量达到 0.5% 时,PI/CF/CNTs 复合材料的高温拉伸强度低于 PI/CF 复合材料,在选择 CNTs 含量范围内,PI/CF/CNTs 复合材料的高温拉伸弹性模量均低于 PI/CF 复合材料。

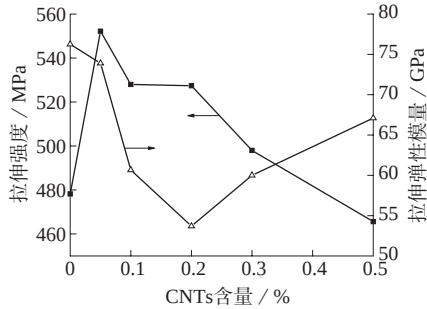


图4 不同CNTs含量的PI/CF/CNTs复合材料的高温拉伸性能

图5为不同CNTs含量的PI/CF/CNTs复合材料的高温弯曲性能。由图5可以看出,随着CNTs含量的增加,PI/CF/CNTs复合材料的高温弯曲强度和高温弯曲弹性模量均先升高后降低,其中当CNTs的含量为0.05%时,高温弯曲强度和高温弯曲弹性模量均达到最大值,相较于PI/CF复合材料,高温弯曲强度由396 MPa提高到434 MPa,提高了9.6%,高温弯曲弹性模量由46.0 GPa提高到48.6 GPa,提高了5.7%。当CNTs的含量达到0.5%时,PI/CF/CNTs复合材料的高温弯曲强度低于PI/CF复合材料,CNTs的含量大于0.1%时,PI/CF/CNTs复合材料的高温弯曲弹性模量低于PI/CF复合材料。

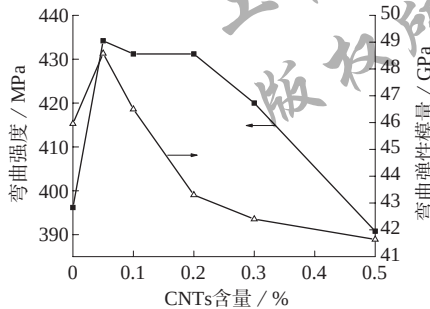


图5 不同CNTs含量的PI/CF/CNTs复合材料的高温弯曲性能

图6为不同CNTs含量的PI/CF/CNTs复合材料的高温层间剪切强度。由图6可以看出,随着CNTs含量的增加,PI/CF/CNTs复合材料的高温层间剪切强度先升高后降低,CNTs的含量在0.1%~0.5%范围内时,CNTs的添加量对PI/CF/CNTs

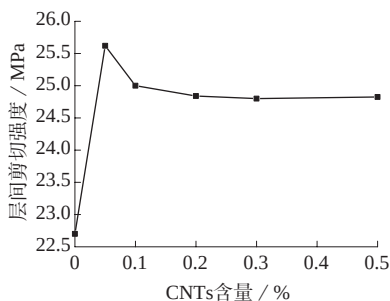


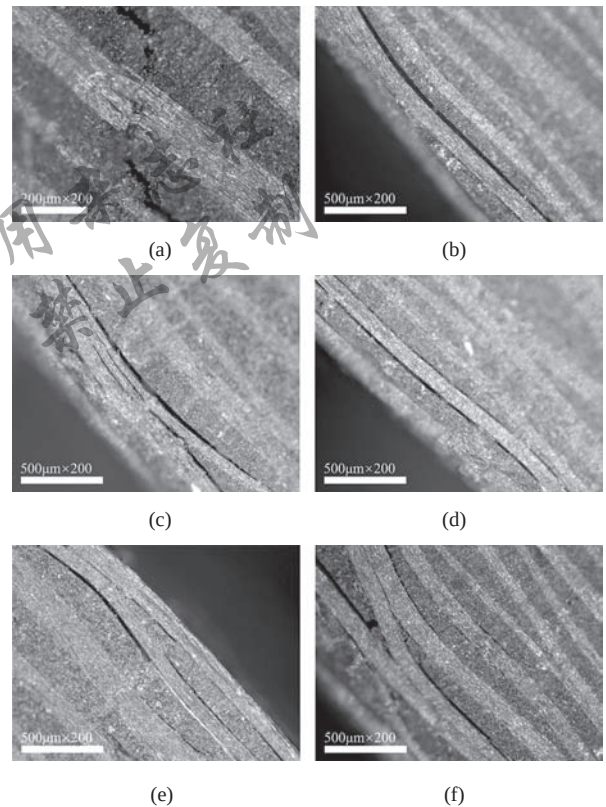
图6 不同CNTs含量的PI/CF/CNTs复合材料的高温层间剪切强度

复合材料的高温层间剪切强度影响不大,当CNTs的含量为0.05%时,PI/CF/CNTs复合材料的高温层间剪切强度达到最大,相较于PI/CF复合材料,高温层间剪切强度由22.7 MPa提高到25.6 MPa,提高了12.8%。

由图4~图6可以看出,CNTs的含量为0.05%时,PI/CF/CNTs复合材料的高温拉伸强度、高温弯曲强度和弯曲弹性模量、高温层间剪切强度都达到最大。

2.3 PI/CF/CNTs复合材料的破坏形貌分析

不同CNTs含量的PI/CF/CNTs复合材料试样常温弯曲测试后的破坏形貌如图7所示。



CNTs 含量: a—0%; b—0.05%; c—0.1%;
d—0.2%; e—0.3%; f—0.5%

图7 不同CNTs含量的PI/CF/CNTs复合材料试样常温弯曲测试后的破坏形貌

从图7可以看到,具有不同CNTs含量的PI/CF/CNTs复合材料的弯曲破坏形式主要有两种:一种是层内破坏,如图7a所示,裂纹在PI/CF复合材料单层内扩展,裂纹扩展受阻然后发生偏转,扩展路径变长,因此层内破坏耗散能量高,同时由于裂纹偏转会引起多个层间分层破坏,甚至引起纤维断裂,使得复合材料的抗弯曲载荷能力迅速降低;另一种是层间的分层破坏,如图7b所示,裂纹在经向纤维

与纬向纤维间的界面处产生,并沿着界面扩展,由于复合材料的层与层之间的界面是复合材料的薄弱点,因此分层破坏耗散能量较低,不同于层内破坏,分层破坏仅沿着界面处扩展,不会引起复合材料朝深度方向破坏,发生分层破坏后,复合材料依然具有较高的抗弯曲载荷能力。从图 7 可以发现,PI/CF 复合材料在受到弯曲载荷时,发生层内破坏,裂纹朝深度方向扩展并引起纤维断裂。添加 CNTs 后,PI/CF/CNTs 复合材料主要发生层间的分层破坏,同时可以发现,随着 CNTs 含量的增加,PI/CF/CNTs 复合材料同时发生多个层间的分层破坏,CNTs 含量越高,分层破坏越严重,当 CNTs 的含量为 0.5% 时,如图 7f 所示,裂纹在 PI/CF/CNTs 复合材料中即沿着界面扩展发生分层破坏,也发生裂纹偏转产生层内破坏。

2.4 CNTs 含量对 PI/CF/CNTs 复合材料动态力学性能的影响

不同 CNTs 含量的 PI/CF/CNTs 复合材料的储能模量曲线如图 8 所示。

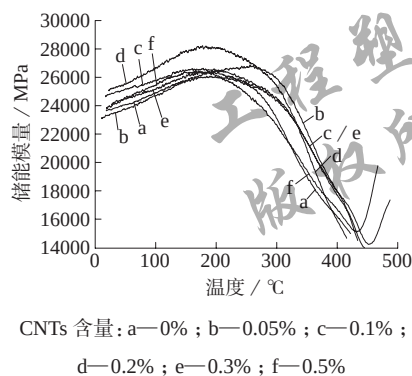


图 8 不同 CNTs 含量的 PI/CF/CNTs 复合材料的储能模量曲线

由图 8 可以发现,当温度低于 200℃时,随着温度的升高,储能模量逐渐升高,表明在室温~200℃范围内,温度越高 PI/CF/CNTs 复合材料的力学性能越好,当温度超过 300℃时,储能模量迅速降低,意味着 PI/CF/CNTs 复合材料的力学性能也会随之降低。其次,在低于 100℃的低温区,在同一温度下 CNTs 含量为 0.2% 的 PI/CF/CNTs 复合材料具有最高的储能模量,在 300~400℃的高温区,在同一温度下 CNTs 含量为 0.05% 的 PI/CF/CNTs 复合材料具有最高的储能模量,这与图 1~图 6 的力学性能测试结果相吻合,即当 CNTs 含量为 0.2% 时,PI/CF/CNTs 复合材料具有最佳的常温力学性能,当 CNTs 含量为 0.05% 时,PI/CF/CNTs 复合材料具有最佳的高温力学性能。

图 9 是不同 CNTs 含量的 PI/CF/CNTs 复合材料的损耗因子曲线(为清晰区分各曲线,对各曲线进行了上下平移)。从图 9 可以发现,相较于 PI/CF 复合材料,添加 CNTs 后,PI/CF/CNTs 复合材料的损耗因子曲线的峰值温度向高温方向偏移,以损耗因子曲线的峰值温度作为复合材料的玻璃化转变温度(T_g),不同 CNTs 含量的 PI/CF/CNTs 复合材料的 T_g 见表 1。由表 1 可以看出,随着 CNTs 含量的增加,PI/CF/CNTs 复合材料的 T_g 先升高后降低,当 CNTs 含量为 0.2% 时,PI/CF/CNTs 复合材料的 T_g 提高幅度最大,由 CNTs 含量为 0% 时的 357℃ 提高到 451℃。添加 CNTs 后,PI 树脂中的自由体积减少,PI 分子链运动受阻,因此复合材料的 T_g 升高,当添加 CNTs 的含量过多时,树脂的黏度升高,在固化时分子链运动能力受阻,活性官能团的转化率降低,树脂的交联程度降低,因此 CNTs 的含量过高后,复合材料的 T_g 会降低。

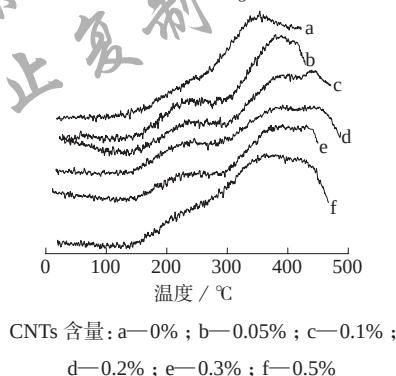


图 9 不同 CNTs 含量的 PI/CF/CNTs 复合材料的损耗因子曲线

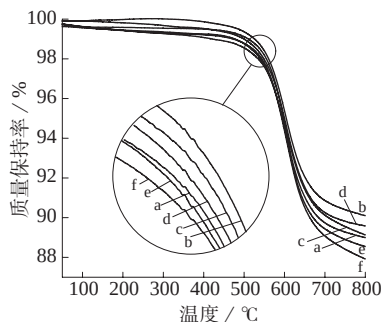
表 1 不同 CNTs 含量的 PI/CF/CNTs 复合材料的 T_g /℃

CNTs 含量/%	T_g
0	357
0.05	378
0.1	443
0.2	451
0.3	431
0.5	414

2.5 CNTs 含量对 PI/CF/CNTs 复合材料热稳定性的影响

图 10 是不同 CNTs 含量的 PI/CF/CNTs 复合材料的 TG 曲线。由图 10 可以得到 PI/CF/CNTs 复合材料的热分解温度和失重率,其结果见表 2。由表 2 可以看出,不同 CNTs 含量的 PI/CF/CNTs 复合材料的起始热分解温度都在 550~557℃ 范围内,热分解 5% 温度都在 600~605℃ 范围内,800℃ 失重率大都在 10%~12% 范围内,可见,添加 CNTs 后 PI/CF/CNTs 复合材料的热稳定性并没有明显

变化。这可能是因为 CNTs 的添加并不会根本上改变 PI 树脂的分子链结构,因此, CNTs 对 PI/CF/CNTs 复合材料的热稳定性没有明显影响。



CNTs 含量: a—0%; b—0.05%; c—0.1%;
d—0.2%; e—0.3%; f—0.5%

图 10 不同 CNTs 含量的 PI/CF/CNTs 复合材料的 TG 曲线

表 2 不同 CNTs 含量的 PI/CF/CNTs 复合材料的热分解数据

CNTs 含量 / %	起始热分解 温度 / °C	热分解 5% 温度 / °C	800°C 失重 率 / %
0	550.4	600.7	10.72
0.05	555.5	605.0	9.85
0.1	553.9	603.4	10.54
0.2	550.0	600.5	10.36
0.3	557.0	600.1	10.99
0.5	556.6	601.3	11.86

3 结论

(1) 相较于 PI/CF 复合材料, CNTs 含量为 0.2% 时, PI/CF/CNTs 复合材料具有最佳的常温力学性能,其中常温拉伸强度提高 19.5%,常温弯曲强度提高 20.6%,常温层间剪切强度提高 14.7%。

(2) 相较于 PI/CF 复合材料, CNTs 含量为 0.05% 时, PI/CF/CNTs 复合材料具有最佳的高温力学性能,其中 400°C 拉伸强度提高 15.8%,400°C 弯曲强度提高 9.6%,400°C 层间剪切强度提高 12.8%。

(3) CNTs 的添加可以提高 PI/CF/CNTs 复合材料的 T_g ,相较于 PI/CF 复合材料, CNTs 含量为 0.2% 时, T_g 由 357°C 提高到 451°C。

(4) CNTs 的添加对 PI/CF/CNTs 复合材料的热稳定性几乎没有影响。

参考文献

- [1] Gouzman I, Grossman E, Verker R, et al. Advances in polyimide-based materials for space applications[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(18). doi:10.1002/adma.201807738.
- [2] Ansari R, Hassanzadeh-Aghdam M K, Darvizeh A. Coefficients of thermal expansion of carbon nanotube-reinforced polyimide nanocomposites: A micromechanical analysis[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2019, 233(2):169–179.
- [3] Jang H G, Yang B, Khil M S, et al. Comprehensive study of effects of filler length on mechanical, electrical, and thermal properties of multi-walled carbon nanotube / polyamide 6 composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 125. doi:10.1016/j.compositesa.2019.105542.
- [4] 陈天华. 碳纳米管 / 石墨 / 碳纤维增强聚酰亚胺树脂复合材料的摩擦磨损性能研究 [J]. *广东化工*, 2018, 45(6):9–10.
Chen Tianhua. Friction and wear properties of carbon nanotubes / graphite / carbon fiber reinforced polyimide resin composites [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2018, 45(6):9–10.
- [5] Mohamed M G, Kuo S W. Functional polyimide / polyhedral oligomeric silsesquioxane nanocomposites[J]. *Polymers*, 2019, 11(1). doi:10.3390/polym11010026.
- [6] Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon[J]. *Nature*, 1991, 354:56–58.
- [7] Baughman R H, Cui C, Zakhidov A A, et al. Carbon nanotube actuators[J]. *Science*, 1999, 284:1 340–1 344.
- [8] Frank S, Poncharal P, Wang Z L, et al. Carbon nanotube quantum resistors[J]. *Science*, 1998, 280:1 744–1 746.
- [9] 阳范文, 欧阳阅翰, 沈佳豪, 等. 碳纳米管改性 PA6 复合材料的制备与性能 [J]. *工程塑料应用*, 2019, 47(9):12–16.
Yang Fanwen, Ouyang Yuehan, Shen Jiahao, et al. Preparation and properties of carbon nanotube-modified PA6 composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2019, 47 (9):12–16.
- [10] 郭怡, 严磊, 陈宇哲, 等. 碳纳米管改性热塑性聚氨酯纳米复合材料研究进展 [J]. *工程塑料应用*, 2019, 47(6):139–142.
Guo Yi, Yan Lei, Chen Yuzhe, et al. Research progress of carbon nanotubes modified thermoplastic polyurethane-based nanocomposites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2019, 47 (6):139–142.
- [11] Lee W J, Clancy A J, Fernández-Toribio J C, et al. Interfacially-grafted single wall carbon nanotube / poly (vinyl alcohol) composite fibers[J]. *Carbon*, 2019, 146:162–171.
- [12] Yang Zhoufei, Tian Jiarui, Yin Zefang, et al. Carbon nanotube- and graphene-based nanomaterials and applications in high-voltage supercapacitor: A review[J]. *Carbon*, 2019, 141:467–480.
- [13] 邢亮臣, 陈孝起, 周海军, 等. 聚酰亚胺 / 碳纳米管复合材料的制备与性能 [J]. *工程塑料应用*, 2018, 46(11):39–42.
Xing Liangchen, Chen Xiaoqi, Zhou Haijun, et al. Preparation and properties of polyimide / carbon nanotube composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2018, 46(11):39–42.
- [14] 郭政华, 雷丹妮, 刘婷, 等. 多壁碳纳米管 / 聚酰亚胺复合薄膜的制备与性能研究 [J]. *山东化工*, 2018, 47(12):16–18.
Guo Zhenghua, Lei Danni, Liu Ting, et al. Preparation and properties of multi-walled carbon nanotubes / polyimide composite films[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2018, 47(12):16–18.
- [15] 雷晓庆. 碳纳米管 / 聚酰亚胺复合碳纤维的制备与性能 [J]. *分析仪器*, 2018(5):105–111.
Lei Xiaoqing. Preparation and properties of carbon nanotubes / polyimide composite carbon fibers[J]. *Analytical Instrument*, 2018 (5):105–111.