

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.09.003

碳纳米管改性 PA6 复合材料的制备与性能

阳范文¹, 欧阳阅翰², 沈佳豪¹, 孙书情¹, 柳蔚洲², 李荣荣¹, 徐蒙蒙¹, 陈安鸿¹, 田秀梅¹, 陈晓明¹

(1. 广州医科大学基础医学院生物医学工程系, 广州 511436; 2. 广州市第六中学, 广州 510300)

摘要: 以 YY-702 为增容偶联改性剂, 采用熔融共混方法分别制备尼龙 (PA)6 / 碳纳米管 (CNTs)-10, PA6 / CNTs-5 复合材料, 系统研究了 YY-702 用量对复合材料的熔体流动速率 (MFR)、力学性能和热力学行为的影响。结果表明, 随着 YY-702 含量增加, PA6 / CNTs 复合材料的拉伸强度呈上升趋势; 当 YY-702 质量分数分别为 3% 和 4% 时, PA6 / CNTs-10, PA6 / CNTs-5 复合材料的拉伸强度达到最大值, 分别为 72.2 MPa 和 75.8 MPa。随着 YY-702 含量的增加, 复合材料的 MFR 逐渐降低, 当 YY-702 质量分数 $\geq 3\%$ 时, MFR 基本保持不变, 添加 CNTs-5 的 MFR 相对较小。差示扫描量热分析表明, 对于 PA6 / CNTs-10 和 PA6 / CNTs-5 两种复合材料, 当 YY-702 质量分数分别小于 3% 和 4% 时, 熔融曲线和结晶曲线均未出现 YY-702 的熔融峰和结晶峰; 而继续增大用量后分别在 152.3℃ 和 150.4℃ 处出现较为明显的 YY-702 的熔融峰。YY-702 对 PA6 / CNTs-10 和 PA6 / CNTs-5 产生了较好的增容偶联效果, 最佳用量分别为 3% 和 4%。

关键词: 尼龙 6; 碳纳米管; 改性; 力学性能; 结晶行为

中图分类号: TB322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)09-0012-05

Preparation and Properties of PA6 Composite Modified by Carbon Nanotubes

Yang Fanwen¹, Ouyang Yuehan², Shen Jiahao¹, Sun Shuqing¹, Liu Weizhou², Li Rongrong¹, Xu Mengmeng¹,
Chen Anhong¹, Tian Xiumei¹, Chen Xiaoming¹

(1. Department of Biomedical Engineering, School of Basic Medical Sciences, Guangzhou Medical University, Guangzhou 511436, China;

2. Guangzhou No.6 Middle School, Guangzhou 510300, China)

Abstract : Polyamide(PA)6 / CNTs-10 and PA6 / CNTs-5 blends were prepared by melt blending with YY-702 as compatibilization and coupling modifier. The effects of YY-702 content on melt index, mechanical properties and thermodynamic behavior of the blends were systematically studied. The results show that tensile strength of PA6 / CNTs composites increase with the increase of YY-702 content, and the melt flow index decreases gradually. When the mass fraction of YY-702 is 3%, the tensile strength of PA6 / CNTs-10 blends reaches the maximum value of 72.2 MPa, and when the amount of YY-702 is 4%, the tensile strength of PA6 / CNTs-5 blends reach the maximum value of 75.8 MPa. When the content of YY-702 is greater than or equal to 3%, the melt flow index remain basically unchanged, and the melt flow index of CNTs-5 is relatively small. For the blends of PA6 / CNTs-10 and PA6 / CNTs-5, when the dosage of YY-702 is less than 3% and 4% respectively, the melting and crystallization peaks of YY-702 are not found on the corresponding curve. The melt peaks of YY-702 were observed at 152.3℃ (in the PA6 / CNTs-10 system) and 150.4℃ (in the PA6 / CNTs-5 system), respectively. Generally speaking, YY-702 produces good compatibilization and coupling effects on PA6 / CNTs-10 and PA6 / CNTs-5 blends, the optimum dosage is 3% (in the PA6 / CNTs-10 system) and 4% (in the PA6 / CNTs-5 system), respectively.

Keywords: polyamide 6; carbonnanotubes; modify; mechanical property; crystallization

基金项目: 广州市高校创新创业教育平台建设重点项目 (201709P05), 2019 年度广东省攀登计划项目 (pdjh2019b0399), 2018 年度广东省本科高校创新创业教改项目 (2018A073856)

通讯作者: 阳范文, 博士, 教授, 主要从事生物医学高分子材料与 3D 打印研究 E-mail: yangfanwen@163.com

收稿日期: 2019-06-22

引用格式: 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, 27.

Yang Fanwen, Ouyang Yuehan, Shen Jiahao, et al. Preparation and properties of PA6 Composite modified by carbon nanotubes[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(9): 12-16, 27.

尼龙 (PA)6 即聚己内酰胺,是尼龙品种中占绝对主导地位的一类,具有优良的力学性能、耐磨性、耐酸碱性、自润滑性等优点,是一种综合性能优异、应用广泛的热塑性工程塑料^[1],广泛应用于轴承、齿轮、风扇叶片、汽车部件、医疗器材、油管、油箱、电子电器制品等方面^[2]。但受制于本身结构,PA6 的拉伸强度、拉伸弹性模量等力学性能并不是很突出,故而限制了其发展,改性研究成为了 PA6 扩大应用领域的唯一选择^[3-5]。

碳纳米管 (CNTs) 是一种具有独特结构的一维纳米材料,其碳原子之间存在的强 δ 键合, C—C 键之间的 π 键合以及多壁 CNTs 层与层之间的相互作用力使得 CNTs 具有极高的强度、韧性和弹性模量^[6]。其弹性模量可达 1 TPa,与金刚石的弹性模量几乎相同,约为钢的 5 倍;其理论拉伸强度为 50~200 GPa,是钢的 100 倍,而密度仅为钢的 1/6。因其同时具有碳纤维的固有特性、金属材料的导电导热特性、陶瓷材料的耐热耐腐蚀性、纺织纤维的柔软可编制性以及高分子材料的轻度易加工性,故属于一种一材多用的功能材料,有“超级纤维”之称^[7-8]。CNTs 在与高分子材料复合时,会形成完整的结合界面,得到性能优异的复合材料^[9-11]。

近年来,聚合物/CNTs 复合材料的研究已成为纳米科学研究中的一个新热点,相关研究硕果累累^[12]。如陈建军等^[13]制备的环氧树脂/功能化 CNTs 多孔复合材料很好地改善了 CNTs 的分散性能及材料的电磁屏蔽性能。陆健^[14]研究的水性环氧/CNTs 形状记忆复合材料,经检测具有优异的力学与形状记忆性能,还具有一定的采集和转换温差能的能力。刘大晨等^[15]制备的三元乙丙橡胶/多壁 CNTs 复合材料, CNTs 均匀地分散在聚合物中,形成了有效的导电导热网链,很好地提高了材料的热稳定性,同时该种材料还具有较好的物理力学性能。

将聚己内酰胺与 CNTs 进行复合研究,可以完美结合 PA6 和 CNTs 的优势,弥补单一材料的不足之处,得到性能优异的复合材料,扩大应用范围^[16]。例如 Hyperion 公司利用 CNTs 的优良导电性能,将 CNTs 添加在聚合物中,制得聚酰胺/CNTs(PA6/CNTs2, PA66/CNTs2)、PEI/CNTs2, PS/CNTs2 等多种复合材料,在增强聚合物的同时获得导电和抗静电功能,以 CNTs 母粒和 CNTs 改性材料等形式进行销售,获得了极大的经济效益。

笔者分别利用 CNTs-10 和 CNTs-5 两种直径的

CNTs 对 PA6 进行改性,以 YY-702 为增容偶联改性剂,成功制备了一种力学性能优异的复合材料。同时该实验对 PA6/CNTs-10 和 PA6/CNTs-5 两种复合材料的增韧改性效果进行了探索,并对用两种直径 CNTs 改性后的增韧效果差异性进行了比较,为 PA6/CNTs 增韧改性研究提供了新的实验数据。

1 实验部分

1.1 原材料

PA6: MD2400,新会美达公司;

CNTs-5 和 CNTs-10: 直径分别为 5 nm 和 10 nm,深圳三顺纳米新材料股份有限公司;

增容偶联改性剂: YY-702,广州源泰合成材料有限公司。

1.2 主要设备及仪器

双螺杆挤出机: SHT-40 型, $L/D=40$, 南京橡塑机械厂公司;

注塑机: HTB80 型, 宁波海天机械有限公司;

万能试验机: CMT40204 型, 20 kN, 深圳新三思材料检测有限公司;

差示扫描量热 (DSC) 仪: DSC204HP 型, 德国耐驰公司;

熔体流动速率 (MFR) 仪: MTM1000 型, 深圳新三思材料检测有限公司。

1.3 试样制备

将 PA6, CNTs 和 YY-702 等组分按照表 1 和表 2 配方进行称量,混合 3~5 min。然后采用双螺杆挤出机进行熔融共混,挤出机的温度设定为: 下料口 220℃、第 1~10 区 240℃、模头 240℃,螺杆转速 300 r/min。拉条水冷切粒,制得 PA6/CNTs 改性材料。在 80℃条件下干燥 3~4 h,采用注塑机在 260℃下注塑成标准试样。

表 1 PA6/CNTs-10 共混体系的配方设计

材料	试样编号					%
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	
PA MD2400	95	94	93	92	91	
YY-702	0	1	2	3	4	
CNTs-10	5	5	5	5	5	

表 2 PA6/CNTs-5 共混体系的配方设计

材料	试样编号					%
	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]	10 [#]	
PA MD2400	95	94	93	92	91	
YY-702	0	1	2	3	4	
CNTs-5	5	5	5	5	5	

1.4 性能测试

拉伸性能按 GB/T 1040-2006 测试,拉伸速率为 50 mm/min;

MFR 按 GB/T 3682-2000 测试,温度 250℃,载荷 2.16 kg;

热力学行为采用 DSC 测试,温度为 20~300℃,升温速度 10℃/min。

2 结果与讨论

2.1 YY-702 用量对 PA6/CNTs 复合材料拉伸性能影响

两种 CNTs 改性 PA6 的拉伸性能见图 1。

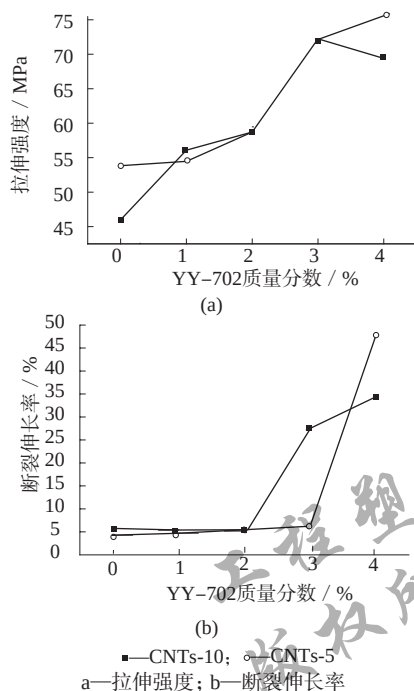


图1 不同 YY-702 含量的两种 CNTs 改性 PA6 复合材料的拉伸性能

随着 YY-702 含量增加, PA6/CNTs-5 复合材料的拉伸强度呈上升趋势;当 YY-702 质量分数达到 4% 时,拉伸强度为 75.8 MPa。随着 YY-702 含量的增加, PA6/CNTs-10 复合材料的拉伸强度呈先上升后减小的变化趋势;当 YY-702 质量分数达到 3% 时,拉伸强度最大值为 72.2 MPa。相比较, CNTs-5 的补强效果略优于 CNTs-10。产生上述现象的原因在于 CNTs 是一种具有一定长径比的纤维状物质,加入 PA6 中会产生一定的补强效应,补强效果与 CNTs 的长径比有关,而且与 PA6/CNTs 界面结合有关。CNTs-5 的长径比大于 CNTs-10,故其补强效果相对较好;YY-702 是一种含有反应性官能团的增容偶联复合改性剂,随着其用量增加,PA6 与 CNTs 的界面结合力提高,故拉伸强度改善;其添加最佳用量应该是有效润湿 CNTs 表面,超过这个用量就会出现过饱和现象,可能产生增塑效应,故拉伸强度反而下降。

两种复合材料的断裂伸长率均呈现逐步增大的趋势。YY-702 含量对两种 CNTs 改性复合材料的断裂伸长率影响存在一定差异:对于 PA6/CNTs-10 复合材料,当 YY-702 质量分数 $\geq 3\%$ 时,断裂伸长率出现突变,质量分数为 4% 时最大值为 38%;而对于 PA6/CNTs-5 复合材料,当 YY-702 质量分数 $\geq 4\%$ 时才出现断裂伸长率的突变,最大值为 47.5%。产生上述现象的原因在于 CNTs 直径小、比表面积非常大,当 YY-702 添加量达到一定程度后,才能在界面产生较好的相容性,故当其用量较低时,材料的断裂伸长率基本不变;进一步提高其用量,当其在 PA6/CNTs 基体之间的界面产生良好增容效果时,PA6/CNTs 材料的拉伸强度和断裂伸长率就获得明显改善。由于 CNTs-5 的直径小于 CNTs-10,故界面达到饱和所需的 YY-702 用量较多,故质量分数为 3% 时 PA6/CNTs-10 复合材料可能基本达到饱和,进一步增加其用量,拉伸强度反而下降;而 PA6/CNTs-5 复合材料在 YY-702 质量分数为 3% 时尚未饱和,故拉伸强度和断裂伸长率仍然保持上升趋势。

2.2 YY-702 用量对 PA6/CNTs 复合材料 MFR 的影响

两种碳纳米管改性 PA6 复合材料的 MFR 如图 2 所示。从图 2 可知,随着 YY-702 含量的增加,两种 CNTs 改性 PA6 复合材料的 MFR 逐渐降低;当其质量分数达到 3% 时,进一步增加其用量, MFR 基本保持不变。产生上述现象的原因与 YY-702 具有偶联增容改性的多种功能有关。YY-702 含有反应性官能团,其一端与 CNTs 的表面产生一定的结合力,另一端与 PA6 的端氨基反应,产生了反应性增容效果,故 PA6/CNTs 复合材料的 MFR 逐渐降低。

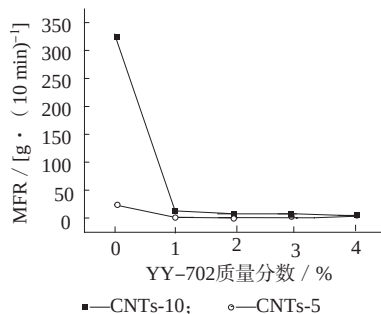


图2 不同 YY-702 含量的两种 CNTs 改性 PA6 复合材料的 MFR

两种 CNTs 对 PA6 的 MFR 的影响存在一定差异,其中添加 CNTs-5 的 PA6/CNTs-5 复合材料的

MFR 相对较低,原因在于 CNTs-5 的直径小,比表面积更大,添加到 PA6 基体中本身会产生一定的增黏效果, CNTs 比表面积越大,添加同样的质量意味着数量越多,产生增黏效果越明显,故 MFR 相对较低。

2.3 YY-702 用量对复合材料热力学行为的影响

YY-702 用量对 PA6 / CNTs 复合材料的热力学行为影响见图 3 和图 4、表 3 和表 4。

图 3 为 PA6 / CNTs-10 复合材料 DSC 曲线。

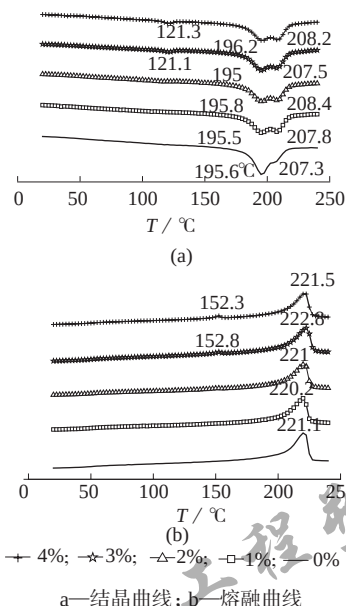


图 3 PA6 / CNTs-10 复合材料的 DSC 曲线

表 3 PA6 / CNTs-10 共混体系的熔融峰和结晶峰

项目	试样编号				
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
熔融峰温度 / °C	221.1	220.2	221.0	152.8, 222.8	152.3, 221.5
熔融热焓 / (UV · mg ⁻¹)	4.1042	3.8796	3.7709	1.8988, 4.0058	1.8806, 3.8863
第 1 结晶峰温度 / °C	207.3	207.8	208.4	207.5	208.2
第 1 结晶峰热焓 / (UV · mg ⁻¹)	-2.575	-2.7921	-2.7479	-2.6291	-2.7275
第 2 结晶峰温度 / °C	195.6	195.5	195.8	195	196.2
第 2 结晶峰热焓 / (UV · mg ⁻¹)	-3.4954	-2.8678	-2.8153	-2.7845	-2.7662
第 3 结晶峰温度 / °C	无	无	无	121.1	121.3
第 3 结晶峰热焓 / (UV · mg ⁻¹)	无	无	无	-1.4889	-1.565

从图 3b 和表 3 可知,未添加 YY-702 复合材料的熔融温度为 221.1℃、熔融热焓为 4.1042 UV / mg ;随 YY-702 含量增加,熔融温度和热焓均呈现先减小后增加,最后略有降低的变化趋势;当 YY-702 质量分数为 3% 时,熔融温度最高为 222.8℃;

当 YY-702 质量分数为 3% 和 4% 时,分别在 152.8 和 152.3℃ 出现了第 2 个熔融峰,该峰对应 YY-702 的熔融峰。而当其质量分数 ≤ 2% 时,没有出现 YY-702 的熔融峰。

从图 3a 和表 3 可知,未添加 YY-702 时,207℃ 处的第 1 结晶峰不明显,添加了 YY-702 后在 207℃ 的第 1 结晶峰值明显增大;当 YY-702 质量分数 ≤ 2% 时,结晶曲线只出现 2 个结晶峰;当其质量分数 ≥ 3% 时,出现了 3 个结晶峰。推测当其用量达到 3% 时在两相界面到达饱和,与拉伸强度达到最大值的用量一致,说明对 PA6 / CNTs-10 复合材料,添加质量分数 3% 的 YY-702 为最佳用量。

图 4 为 PA6 / CNTs-5 复合材料 DSC 曲线。从图 4b 和表 4 可知,未添加 YY-702 复合材料的熔融温度为 221.4℃、熔融热焓为 4.3936 UV / mg ;随着 YY-702 含量的增加,熔融温度呈上升变化趋势,而热焓基本保持不变。当 YY-702 质量分数 ≤ 3% 时,只出现了 PA6 的熔融峰,没有出现 YY-702 的熔融峰;当 YY-702 质量分数达到 4% 时,熔融温度最高为 222.3℃,且在 150.4℃ 出现了第 2 个熔融峰,为 YY-702 的熔融峰。

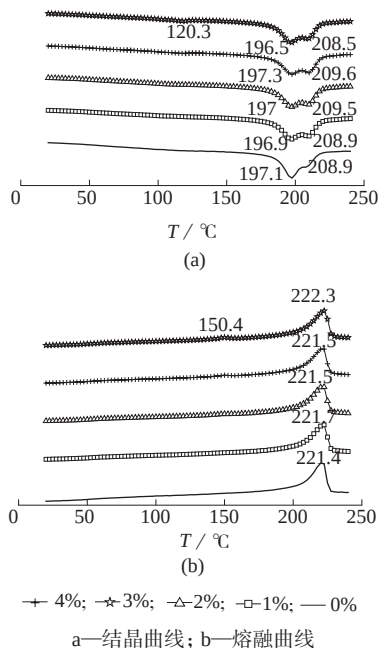


图 4 PA6 / CNTs-5 复合材料的 DSC 曲线

从图 4a 和表 4 可知,未添加 YY-702 时,208.9℃ 处的第 1 结晶峰不明显,添加了 YY-702 时在 208.9℃ 的第 1 结晶峰值明显增大;当 YY-702 质量分数 ≤ 3% 时,结晶曲线只出现 2 个结晶峰;当其质量分数为 4% 时,出现了 3 个结晶峰。推测

当其质量分数达到4%时在两相界面到达饱和,与拉伸强度达到最大值的用量一致,说明对于PA6/CNTs-5复合材料,质量分数为4%的YY-702为最佳用量。

表4 PA6/CNTs-5 共混物的熔融峰和结晶峰

项目	试样编号				
	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]	10 [#]
熔融峰温度 / °C	221.4	221.7	221.5	221.5	150.4, 222.3
熔融热焓 / (UV · mg ⁻¹)	4.3936	4.0615	4.0619	4.0447	1.809 4, 4.052 9
第1结晶峰温度 / °C	208.9	208.9	209.5	209.6	208.5
第1结晶峰热焓 / (UV · mg ⁻¹)	-2.6356	-2.7693	-2.857	-2.8262	-2.753 9
第2结晶峰温度 / °C	197.1	196.9	197	197.3	196.5
第2结晶峰热焓 / (UV · mg ⁻¹)	-3.4652	-2.9749	-3.0191	-2.9352	-3.0153
第3结晶峰温度 / °C	无	无	无	无	120.3
第3结晶峰热焓 / (UV · mg ⁻¹)	无	无	无	无	-1.481 1

PA6/CNTs-10和PA6/CNTs-5两种复合材料中,YY-702的最佳用量分别为3%和4%。其原因在于CNTs-5的直径小于CNTs-10,添加相同比例时CNTs-5的数量多、比表面积大,YY-702在界面处基本达到饱和和所需的添加量高,通过该方法结合力学性能的变化情况,可筛选YY-702的最佳用量。

3 结论

(1) 随着YY-702含量增加,PA6/CNTs复合材料的拉伸强度呈上升趋势,CNTs的加入产生了补强效果,CNTs-5的补强效果略优于CNTs-10。

(2) 随着YY-702含量增加,复合材料的MFR逐渐降低,当其质量分数 $\geq 3\%$ 时,MFR基本保持不变,添加CNTs-5的MFR相对较小。

(3) PA6/CNTs-10和PA6/CNTs-5两种复合材料中,当YY-702质量分数分别小于3%和4%时,熔融曲线和结晶曲线均未出现YY-702的熔融峰和结晶峰。

(4) PA6/CNTs-10,PA6/CNTs-5两种复合材料中,添加YY-702时分别在207,208.9℃的结晶峰值增大,YY-702对上述两种复合材料产生了较好的增容偶联效果,最佳质量分数分别为3%和4%。

参考文献

- [1] 代芳,吕召胜,王金立,等. 2015年我国热塑性工程塑料研究进展[J]. 工程塑料应用,2016,44(3):125-134.
- [2] Dai Fang, Lyu Zhaosheng, Wang Jinli, et al. Research progress on

Chinese engineering thermoplastic in 2015[J]. Engineering Plastic Application, 2016, 44(3):125-134.

- [2] Zhao X, Zhan L, Xie B, et al. Products derived from waste plastics (PC, HIPS, ABS, PP and PA6) via hydrothermal treatment: Characterization and potential applications[J]. Chemosphere, 2018. DOI:10.1016/j.chemosphere.2018.05.156.
- [3] 许军,马静,丁会利. 工程塑料PA6增韧改性的研究进展[J]. 塑料工业, 2015, 43(12):1-4, 27.
- Xu Jun, Ma Jing, Ding Huili. Research progress on toughened modification of PA6[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(12):1-4, 27.
- [4] Jia Zhenyu, Cai Ziqing, Chen Jianwen, et al. High efficiency toughness of aromatic sulfonamide in polyamide 6[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018. DOI:10.1002/APP.46527
- [5] Jagtap R N, Mehta L B, Wadgaonkar K K, et al. Microstructural, thermal and rheological correlations to mechanical response of polyamide-6(glass filled)/polyetherimide blend: Effect of ethylene-octene copolymer on toughening of blend[J]. Journal of Materials Science, DOI: 10.1007/s10853-018-2416-z.
- [6] 康黎星,邱江涛,张永毅,等. 碳纳米管阵列的可控生长及应用[J]. 科学通报, 2014, 59(33):3 264-3 279.
- Kang Lixing, Di Jiangtao, Zhang Yongyi, et al. Controllable growth and application of carbon nanotube arrays[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(33):3 264-3 279.
- [7] 孟令杰,伏传龙,路庆华. 碳纳米管的功能化研究[J]. 自然科学进展, 2009, 19(2):148-157.
- Meng Lingjie, Fu Chuanlong, Lu Qinghua. Functionalization of carbon nanotubes[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(2):148-157.
- [8] 阳范文,肖鹏,宁凯军. 抗静电TPV/MB-CNTs共混改性材料的研究[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(2):55-58.
- Yang Fanwen, Xiao Peng, Ning Kaijun. Study on antistatic blends of TPV/MB-CNTs[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(2):55-58.
- [9] 邢亚娟,陈宏源,陈名海,等. 碳纳米管在热管理材料中的应用[J]. 科学通报, 2014, 59(Z2):2 840-2 850.
- Xing Yajuan, Chen Hongyuan, Chen Minghai, et al. Recent developments in the use of carbon nanotube based-composites in thermally managed materials[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(Z2):2 840-2 850.
- [10] 徐蒙蒙,阳范文,王晗,等. PLA/增塑剂/碳纳米管三元共混体系的结构与性能[J]. 合成材料老化与应用, 2017, 46(5):6-9, 18.
- Xu Mengmeng, Yang Fanwen, Wang Han, et al. Structure and properties of PLA/plasticizer/carbon nanotube ternary blend system[J]. Aging and Application of Synthetic Materials, 2017, 46(5):6-9, 18.

(下转第27页)

- based on bi-phase flame-retardant actions[J]. RSC Advances, 2018, 8(18):9985-9995.
- [9] 周子健,姜浩浩,崔爱华,等. 硬质聚氨酯泡沫 / 可膨胀石墨复合材料制备及阻燃性能研究 [J]. 塑料工业, 2018, 46(9):108-112.
Zhou Zijian, Jiang Haohao, Cui Aihua, et al. Preparation and flame retardancy of rigid polyurethane foam / expanded graphite composites[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(9):108-112.
- [10] 孙才英,董子琳,董懿嘉,等. 阻燃剂甲基膦酸二甲酯对硬质聚氨酯泡沫性能的影响 [J]. 塑料科技, 2017, 45(3):90-94.
Sun Caiying, Dong Zilin, Dong Yijia, et al. Effect of flame retardant dimethyl methylphosphonate on properties of rigid polyurethane foam[J]. Plastics Science and Technology, 2017, 45(3):90-94.
- [11] 薛竹林,王亚凤,闫莉,等. 反应型含磷多元醇 / APP 复配阻燃聚氨酯泡沫的制备及性能 [J]. 塑料科技, 2019, 47(5):31-36.
Xue Zhulin, Wang Yafeng, Yan Li, et al. Preparation and properties of peactive phosphorus containing polyol / APP flame retardant polyurethane foam[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(5):31-36.
- [12] 崔飞,颜龙,罗炼. 膨胀蛭石在防火涂料中的阻燃和抑烟作用 [J]. 消防科学与技术, 2016, 35(5):668-671.
Cui Fei, Yan Long, Luo Lian. Effect of expanded vermiculite on flame retardancy and smoke suppression of fire retardant coating[J]. Fire Science and Technology, 2016, 35(5):668-671.
- [13] 方小林. 膨胀蛭石复合阻燃保温材料的制备与性能研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2016.
Fang Xiaolin. Study on preparation and properties of expanded vermiculite composite flame retardant thermal insulation material[D]. Tianjin :Tianjin Polytechnic University, 2016.
- [14] 习永广,彭同江. 膨胀蛭石 / 石膏复合保温材料的制备与表征 [J]. 复合材料学报, 2011, 28(5):156-161.
Xi Yongguang, Peng Tongjiang. Preparation and characterization of expanded vermiculite / gypsum thermal insulation composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(5):156-161.
- [15] El Mouzdahir Y, Elmchaouri A, Mahboub R, et al. Synthesis of nano-layered vermiculite of low density by thermal treatment[J]. Powder Technology, 2009, 189(1):2-5.
- [16] Miao Zhao, Peng Tongjiang, Xi Yongguang, et al. Preparation of expanding vermiculite by chemical and microwave methods[J]. Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, 2010, 96:155-160.
- [17] Mucahit S. Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks[J]. Ceramics International, 2015, 41(2):2 819-2 827.
- [18] Wang Fei, Gao Zhenzhong, Zheng Min, et al. Thermal degradation and fire performance of plywood treated with expanded vermiculite[J]. Fire and Materials, 2016, 40(3):427-433.
- [19] Bian Xiangchen, Tang Jianhua, Li Zhongming, et al. Dependence of flame-retardant properties on density of expandable graphite filled rigid polyurethane foam[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 104(5):3 347-3 355.
- [20] 张志敏. 珍珠岩填充硬质聚氨酯泡沫材料的制备及其阻燃性的研究 [D]. 武汉: 中南民族大学, 2012.
Zhang Zhimin. Preparation and study the flame retardant property of rigid polyurethane foam material filled with perlite[D]. Wuhan:South-Central Minzu University, 2012.
-
- (上接第 16 页)
- [11] 阳范文,尹朝辉,洗彩虹,等. PCL / CNTs 复合材料的性能 [J]. 工程塑料应用, 2017, 45(10):40-45.
Yang Fanwen, Yin Zhaohui, Xian Caihong, et al. Performance of PCL / CNTs composites[J]. Engineering Plastic Application, 2017, 45(10):40-45.
- [12] Phan D C, Jr D G G, Frank B P, et al. Biodegradability of carbon nanotube / polymer nan-composites under aerobic mixed culture conditions[J]. Science of the Total Environment, 2018, 639(15):804-814.
- [13] 陈建军,黄月文,梁彩珍,等. 功能化碳纳米管 / 环氧树脂多孔复合材料制备及电磁屏蔽性能 [J]. 化工进展, 2018, 37(2):664-672.
Chen Jianjun, Huang Yuewen, Liang Caizhen, et al. Preparation and electromagnetic shielding performance of functionalized carbon nanotube / epoxy porous composites[J]. Chemical Industry Progress, 2018, 37(2):664-672.
- [14] 陆健. 碳纳米管 / 水性环氧形状记忆复合材料制备及其热冲击下热力耦合行为研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2018.
Lu Jian. Preparation of carbon nanotube / waterborne epoxy shape memory composites and thermal coupling behavior under thermal shock[D]. Hangzhou:Zhejiang University of Science and Technology, 2018.
- [15] 刘大晨,刘策,汤琦. 多壁碳纳米管 / 三元乙丙橡胶复合材料的热电效应及其力学性能研究 [J]. 化工新型材料, 2018, 46(1):129-132, 139.
Liu Dachen, Liu Ce, Tang Qi. Thermoelectric effect and mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes / ethylene propylene diene monomer composites[J]. New Chemical Materials, 2018, 46(1):129-132, 139.
- [16] Ma Y, Yan C, Xu H, et al. Enhanced interfacial properties of carbon fiber reinforced polyamide 6 composites by grafting graphene oxide onto fiber surface[J]. Applied Surface Science, 2018, 452(15):286-298.