

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.04.001

PE-HD / GNP / MWCNT 纳米复合材料性能

张宝平, 乔小勇, 吴书航, 王建峰, 杨艳宇, 曹艳霞, 王万杰

(河南省先进尼龙材料及应用重点实验室, 郑州大学材料科学与工程学院, 郑州 450001)

摘要: 采用熔融共混法制备了高密度聚乙烯 (PE-HD) / 石墨烯纳米片 (GNP) / 多壁碳纳米管 (MWCNT) 纳米复合材料。研究了 GNP / MWCNT 比例对 PE-HD / GNP / MWCNT 纳米复合材料流变特性、电学及力学性能的影响。结果表明, 3 种 PE-HD / GNP / MWCNT 纳米复合材料的储能模量曲线均在低频区出现“第二平台”。MWCNT 含量增大有利于提高纳米复合材料的导电性, GNP / MWCNT 比例为 2 / 8 时, 复合材料呈现出更低的体积电阻率。当 GNP+MWCNT 含量为 0.5 份、GNP / MWCNT 比例分别为 7 / 3, 5 / 5, 2 / 8 时, PE-HD / GNP / MWCNT 纳米复合材料悬臂梁缺口冲击强度均呈现最大值, 分别为 15.05, 9.98, 10.42 kJ / m², 是纯 PE-HD 的 2.32, 1.54, 1.60 倍。纳米复合材料冲击韧性提高的根本原因在于 GNP 和 MWCNT 协同诱发 PE-HD 基体产生明显的屈服。GNP / MWCNT 填料的加入可使 3 种纳米复合材料的拉伸强度和弯曲强度有所提高。

关键词: 石墨烯纳米片; 多壁碳纳米管; 高密度聚乙烯; 纳米复合材料; 流变特性; 导电性; 力学性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)04-0001-06

Properties of PE-HD / GNP / MWCNT Nanocomposites

Zhang Baoping, Qiao Xiaoyong, Wu Shuhang, Wang Jianfeng, Yang Yanyu, Cao Yanxia, Wang Wanjie

(Henan Key Laboratory of Advanced Nylon Materials and Applications, College of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract : High density polyethylene (PE-HD) / graphene nanoplatelets (GNP) / multi-walled carbon nanotube (MWCNT) nanocomposites were prepared through melt blending. The effects of GNP / MWCNT ratios on the rheological, electrical and mechanical properties of PE-HD / GNP / MWCNT nanocomposites were investigated. The results show that the storage modulus curves of PE-HD / GNP / MWCNT nanocomposites exhibit “second plateau” in the low frequency region. The electrical conductivities of three nanocomposites are greatly improved with the increase of MWCNT content. When the GNP / MWCNT ratio is 2 / 8, the composites exhibit lower volume resistivity. When the MWCNT+GNP content is 0.5 phr, the MWCNT / GNP ratios are 7 / 3, 5 / 5, 2 / 8, the Izod notched impact strength of three composites reaches maxima of 15.05, 9.98, 10.42 kJ / m², are 2.32, 1.54 and 1.60 times as high as PE-HD matrix, respectively. The synergistic effects of MWCNT and GNP fillers induce PE-HD matrix yield significantly, which is the main reason for the high toughness of nanocomposites. The addition of MWCNT / GNP fillers improves the tensile and flexural strength of PE-HD / GNP / MWCNT nanocomposites.

Keywords : graphene nanoplatelets ; multi-walled carbon nanotubes ; high density polyethylene ; nanocomposite ; rheological property ; electrical conductivity ; mechanical property

近年来, 功能性聚合物纳米复合材料越来越受到人们的关注^[1]。加入纳米填料是制备功能性聚合物纳米复合材料的有效方法^[2-3], 可赋予聚合物基体抗静电^[4]、电磁屏蔽^[5]、热传导^[6]等功能。碳系纳米

填料由于其优异的性能引起众多学者的青睐^[7-10], 石墨烯和碳纳米管 (CNT) 是碳系纳米填料中具有代表性的两种。一维结构的 CNT 具有高弹性模量和优异的导电性, 可通过添加 CNT 改善聚合物基体

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51373157)

通讯作者: 王万杰, 副教授, 主要研究方向为高分子复合材料 E-mail : wwj@zzu.edu.cn

收稿日期: 2020-01-17

引用格式: 张宝平, 乔小勇, 吴书航, 等. PE-HD / GNP / MWCNT 纳米复合材料性能 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(4) : 1-6.

Zhang Baoping, Qiao xiaoyong, Wu shuhang, et al. Properties of PE-HD / GNP / MWCNT nanocomposites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(4) : 1-6.

的力学和电学性能。同一维的 CNT 相比,二维结构的石墨烯具有高纵横比,也是理想的增强和导电填料^[3,11]。

将石墨烯和 CNT 杂化,可利用协同效应进一步提高聚合物复合材料的性能。M. Wegrzyn 等^[12]采用母料法熔融共混制备了聚丙烯/多壁碳纳米管/石墨烯纳米片(PP/MWCNT/GNP)纳米复合材料,探究了 MWCNT/GNP 的协同效应对复合材料形态结构、力学和导电性能的影响。郑余晨等^[13]通过酸化和超声作用制备了石墨烯/CNT 杂化材料,实现了对环氧树脂的增强和增韧,指出石墨烯/CNT 的杂化比例是影响聚合物纳米复合材料性能的关键因素。王卫芳等^[14]考察了 GNP/MWCNT 的比例对环氧树脂复合材料力学性能的影响,当 GNP 与 MWCNT 的总质量分数为 0.3%、混合质量比为 50/50 时,复合材料的综合力学性能最佳。目前对于石墨烯/CNT 协同增强热固性树脂的研究较多^[15],而对于热塑性树脂基体的关注较少。Wang Quan 等^[16]对高密度聚乙烯(PE-HD)/GNPs/MWCNTs 复合材料进行了研究,结果发现,填料的加入降低了复合材料的电阻,得到了抗静电 PE-HD 复合材料,但是复合材料的拉伸强度和缺口冲击强度却明显下降。笔者采用简单的球磨超声法对 GNP 与 MWCNT 进行杂化,通过熔融共混法制备 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料,探究了 GNP/MWCNT 比例对 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料流变特性、电学及力学性能的影响。制备的复合材料在具有较低体积电阻率情况下,仍能保持较好的力学性能。

1 实验部分

1.1 主要原料

PE-HD: DMDA-8008, 中国石油天然气股份有限公司独山子石化分公司;

GNP: TNIGNP-2, 层数 < 30 层, 长度 2~13 μm , 中国科学院成都有机化学有限公司;

MWCNT: TNSMH3, 外径 10~20 nm, 长度 0.2~2 μm , 中国科学院成都有机化学有限公司;

无水乙醇: 分析纯, 天津市风船化学试剂科技有限公司;

抗氧化剂: RIANOX 1010, 天津利安隆新材料股份有限公司。

1.2 主要仪器与设备

转矩流变仪: LB-100 型, 上海思尔达科学仪器

有限公司;

真空烘箱: DZX-6050B 型, 上海福玛实验设备有限公司;

旋转流变仪: Bohlin Gemini II 型, 英国马尔文仪器公司;

高阻计: ZC90G 型, 上海泰欧电子有限公司;

摆锤式冲击试验机: PTM1251-B 型, 深圳三思纵横科技股份有限公司;

电子万能试验机: UTM6104 型, 深圳三思纵横科技股份有限公司;

研磨仪: MM400 型, 德国 Retsch 公司;

真空压膜机: FM450 型, 北京富友马科技有限公司;

扫描电子显微镜(SEM): JSM-7500F 型, 日本 JEOL 公司。

1.3 样品制备

(1) GNP+MWCNT 杂化填料的制备。

将 GNP 在研磨仪中研磨后与一定比例的 MWCNT 在无水乙醇中常温下进行超声混合 1 h, 在 60℃ 下烘干后得到不同比例的 GNP+MWCNT 杂化填料(质量比为 7/3, 5/5, 2/8)。

(2) PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的制备。

将 PE-HD 置于真空烘箱中于 80℃ 下干燥 8 h, 按照表 1 配方与不同含量的 GNP+MWCNT 和抗氧化剂进行预混合。预混好的原料在转矩流变仪中熔融共混 10 min, 温度为 180℃, 转速为 60 r/min, 得到 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料。破碎后的复合材料用真空压膜机模压成各种测试样条。PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的具体配方列于表 1。

表 1 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的配方设计 份

组分	编号							
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]
PE-HD	100	99.5	99	98.5	97	95	93	91
GNP+MWCNT	0	0.5	1	1.5	3	5	7	9
抗氧化剂	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

1.4 性能测试

(1) 流变特性测试。

采用旋转流变仪对样品进行动态频率扫描测试, 频率扫描范围为 0.025~100 rad/s, 测试温度为 180℃。

(2) 电学性能测试。

使用高阻计对样品进行电阻测量, 样品为直径 80 mm、厚度 2 mm 的圆片, 样品和电极测量前均

用无水乙醇清洗。

(3) 力学性能测试。

悬臂梁缺口冲击强度: 按照 GB/T 1843-2008 测试, 摆锤能量大小为 5.5 J, 缺口类型为 A 型。

拉伸性能: 按照 GB/T 1040.2-2006 测试, 拉伸速率为 50 mm/min。

弯曲性能: 按照 GB/T 9341-2008 测试, 弯曲速率为 2 mm/min。

SEM 测试: 将复合材料冲击断面喷金后, 采用 SEM 进行微观形态观察。

2 结果与讨论

2.1 流变特性

图 1 和 图 2 分别为 3 种 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的储能模量和损耗模量随着频率变化的曲线。

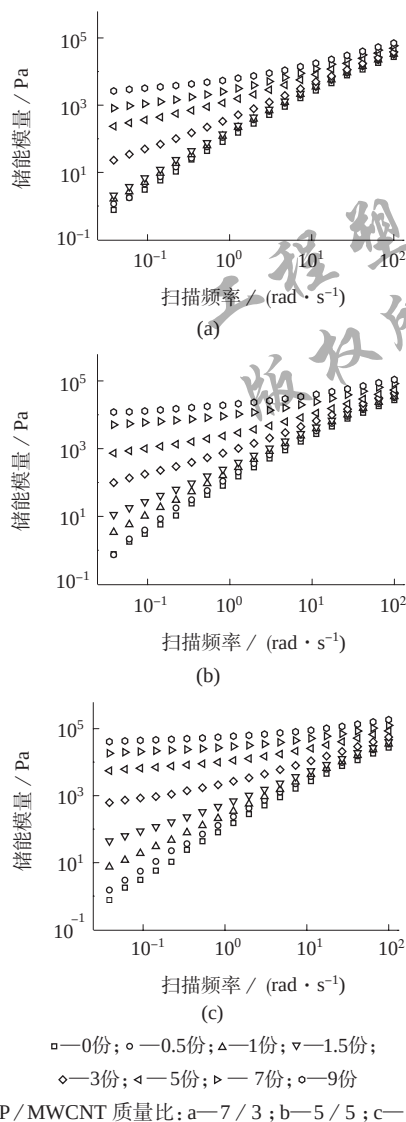


图 1 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的储能模量随着频率变化的曲线

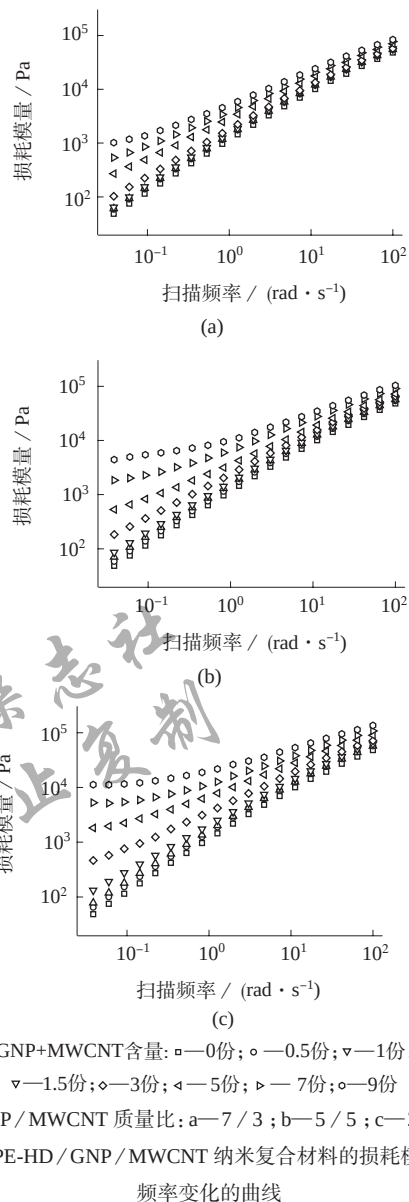


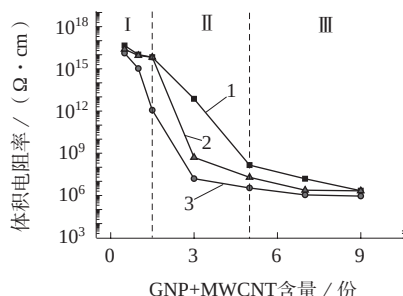
图 2 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的损耗模量随着频率变化的曲线

由图 1 可见, 随着 GNP+MWCNT 含量的增加, 3 种 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的储能模量均逐渐增大, 储能模量曲线在低频区的斜率减小, 呈现出明显的“第二平台”^[17]。在流变学中, “第二平台”的出现是复合材料从类液体向类固体转变的标志, 通常液-固转变的出现表明复合材料内部形成了诸如交联网络、相分离或团聚等有序结构。这里, GNP/MWCNT 的协同作用, 填料的团聚以及与 PE-HD 形成的物理缠结网络是出现第二平台的根本原因。值得关注的是, 随着 MWCNT 在 GNP/MWCNT 中所占比例增加, PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的储能模量曲线对 GNP/MWCNT 含量更为敏感, 储能模量增大, 液-固转变出现在更低的 GNP+MWCNT 含量下, 这是因为

一维的 MWCNT 由于具有较大的长径比,更易与 PE-HD 分子链进行缠结,使得填料与 PE-HD 基体的相互作用增强。3 种 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料损耗模量曲线的变化趋势与储能模量曲线相似。但是随着 GNP+MWCNT 含量的增加,损耗模量在低频区增加的幅度没有储能模量大,这是因为损耗模量代表了复合材料的黏性,对聚合物与纳米填料的界面能或相互作用不敏感。

2.2 电学性能

3 种 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的体积电阻率与 GNP+MWCNT 含量的关系曲线如图 3 所示。



GNP/MWCNT 质量比: 1—7/3; 2—5/5; 3—2/8

图3 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的体积电阻率与 GNP+MWCNT 含量的关系曲线

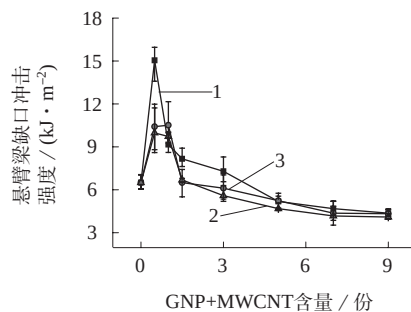
由图 3 可见,随着 GNP+MWCNT 含量的增加,3 种 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的体积电阻率均呈现明显的下降趋势,GNP+MWCNT 的加入能够有效改善 PE-HD 的导电性,表明 GNP 与 MWCNT 具有良好的协同效应。结合 GNP+MWCNT 含量与体积电阻率的变化率可将图 3 分为三个区域: I 区域 (GNP+MWCNT 含量 < 1.5 份), II 区域 (1.5 份 < GNP+MWCNT 含量 < 5 份), III 区域 (GNP+MWCNT 含量 > 5 份)。在 I 区域中,基体中的 GNP/MWCNT 呈现离散状态,既不能彼此重叠形成导电通路,也不能彼此靠近引起电子隧穿效应,此时复合材料电阻还很高,GNP/MWCNT 比例分别为 7/3, 2/8 时,仍处于 10^{15} 以上。在 II 区域中,复合材料体积电阻率下降明显,GNP/MWCNT 比例为 5/5 时,复合材料的体积电阻率下降了 8 个数量级,此时 GNP+MWCNT 填料彼此靠近,通过诱导电子隧穿效应逐渐形成导电网络。在 III 区域中,复合材料的导电网络基本建立,继续增加 GNP+MWCNT 的含量,导电网络将不断完善,复合材料的体积电阻率趋于平稳,当 GNP+MWCNT 含量为 9 份时,复合材料的体积电阻率基本处于

$10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 左右。随着 MWCNT 在 GNP+MWCNT 填料中所占比例的增加,复合材料的体积电阻率逐渐减小。这是因为一维的 MWCNT 比二维的 GNP 长径比大,更易在 PE-HD 中相互接触形成导电通道,而且 MWCNT 的加入在一定程度上提高了 GNP 在 PE-HD 基体中的分散性。

2.3 力学性能

3 种 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的悬臂梁缺口冲击强度与 GNP+MWCNT 含量的关系曲线如图 4 所示。

由图 4 可见,随着 GNP+MWCNT 含量的增加,3 种 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的悬臂梁缺口冲击强度均呈现先增大后减小的趋势。当 GNP+MWCNT 含量为 0.5 份、GNP/MWCNT 比例分别为 7/3, 5/5, 2/8 时,PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的悬臂梁缺口冲击强度均达到最大值,分别为 15.05, 9.98, 10.42 kJ/m^2 ,是纯 PE-HD 悬臂梁缺口冲击强度 6.5 kJ/m^2 的 2.32, 1.54, 1.60 倍,但随着 GNP+MWCNT 含量的增加,复合材料的缺口冲击强度逐渐减小。这是因为低含量时,GNP/MWCNT 的协同作用使得纳米填料在 PE-HD 基体中均匀分散,纳米填料与 PE-HD 的相互作用增强,纳米复合材料在受到冲击时能够诱发基体产生明显屈服,吸收更多的能量,从而使复合材料韧性明显提高。GNP+MWCNT 填料含量增大,会使填料在 PE-HD 基体中发生团聚,形成应力集中点,导致冲击韧性下降。

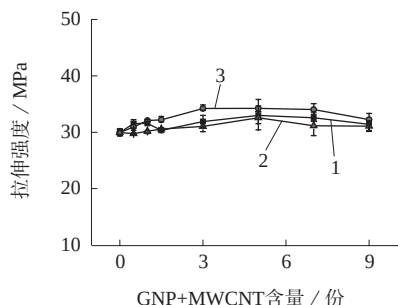


GNP/MWCNT 质量比: 1—7/3; 2—5/5; 3—2/8

图4 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的悬臂梁缺口冲击强度与 GNP+MWCNT 含量的关系曲线

3 种 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的拉伸强度与 GNP/MWCNT 含量的关系曲线如图 5 所示。

由图 5 可见,随着 GNP+MWCNT 含量的增加,3 种 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的拉伸强度均呈现先增后减的趋势。在 GNP/MWCNT

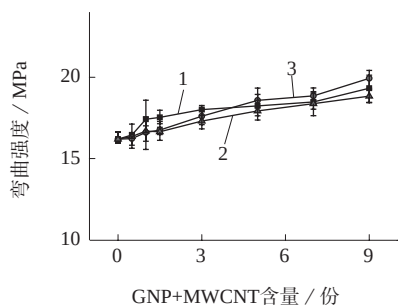


GNP/MWCNT 质量比: 1—7/3; 2—5/5; 3—2/8

图5 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的拉伸强度与 GNP+MWCNT 含量的关系曲线

含量为5份时,三种 PE-HD/GNP/MWCNT 复合材料的拉伸强度均达到最大, GNP/MWCNT 比例分别为 7/3, 5/5, 2/8 时,三种 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料拉伸强度分别为 32.97, 32.56, 34.24 MPa, 相比于纯 PE-HD (拉伸强度为 29.95 MPa), 分别增加了 10.08%, 8.71%, 14.33%。当 GNP/MWCNT 的比例为 2/8 时, PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的拉伸强度较高,表明 MWCNT 含量较高有利于提高填料与 PE-HD 的界面的粘结力。继续增加 GNP/MWCNT 的含量, PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的拉伸强度有轻微下降趋势,但是仍高于纯 PE-HD 的拉伸强度,这是因为填料含量较高时,易发生团聚,使得复合材料在拉伸过程中产生缺陷。

图6是3种 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的弯曲强度与 GNP+MWCNT 含量的关系曲线。



GNP/MWCNT 质量比: 1—7/3; 2—5/5; 3—2/8

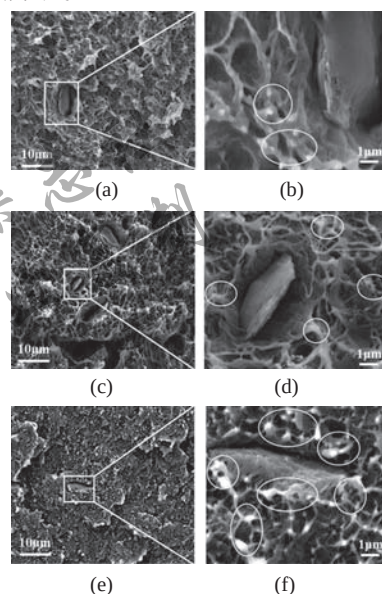
图6 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的弯曲强度与 GNP/MWCNT 含量的关系曲线

由图6可见,3种 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的弯曲强度均随着 GNP/MWCNT 含量的增加而不断提高。GNP+MWCNT 填料作为刚性粒子可以有效地阻碍基体受力时发生变形,能够有效地传递载荷,使得复合材料的弯曲强度得到提高。当 GNP+MWCNT 含量等于3份时, GNP/

MWCNT 比例为 7/3 的复合材料表现出相对较高的弯曲强度,为 18 MPa,而纯 PE-HD 的弯曲强度为 16 MPa。这是因为 GNP/MWCNT 的分散性相对较好,而 GNP 具有更大的表面积,可以更为有效地传递载荷。继续增加 GNP+MWCNT 含量,则三者的弯曲强度相差不大。当 GNP+MWCNT 含量为 9 份、GNP/MWCNT 比例为 2/8 时,复合材料的弯曲强度约达到 20 MPa。

2.4 微观形态分析

GNP+MWCNT 含量为 0.5 份时,3种 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料冲击断面的 SEM 图片如图7所示。



GNP/MWCNT 质量比: a—7/3; c—5/5; e—2/8

b, d, f 分别为 a, c, e 的局部放大图

图7 GNP/MWCNT 含量为 0.5 份时 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料冲击断面的 SEM 图片

由图7a, 7c 和 7e 可见,3种 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的冲击断面粗糙,形成了类似于网络状的结构, GNP 分散良好,在其周围出现明显的空化情况,表明在冲击过程中, PE-HD 基体发生较为明显的屈服。由图7b, 7d 和 7f 的局部放大图可以发现,冲击断面上的网络结构是由屈服的 PE-HD 基体和 MWCNT 构成,仅能看到少量的游离 MWCNT,说明 PE-HD 和 MWCNT 的相互作用较强,而且 MWCNT 的加入在一定程度上改善了 GNP 与 PE-HD 基体的界面相容性。因此,当复合材料在受到冲击时,分散在 PE-HD 基体中的 MWCNT 可以传递冲击应力并诱发 PE-HD 基体屈服,通过 GNP 大的表面积分散冲击应力,使 GNP 周

围出现空洞,从而吸收更多能量,使得纳米复合材料的冲击韧性提高。当 GNP/MWCNT 的比例为 7/3 时, GNP 和 MWCNT 协同作用引起 PE-HD 屈服的程度较高,故复合材料表现出较高的韧性。

3 结论

(1) 3 种 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的储能模量曲线均在低频区出现“第二平台”,复合材料呈现出明显的液-固转变,并随着 MWCNT 在 GNP+MWCNT 中含量的增加,液-固转变对应的 GNP+MWCNT 的含量减小。

(2) 随着 GNP+MWCNT 含量的增加, PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的体积电阻率逐渐减小, MWCNT 含量增大则有利于提高复合材料的导电性。

(3) 当 GNP+MWCNT 含量为 0.5 份时, 3 种 PE-HD/GNP/MWCNT 纳米复合材料的悬臂梁缺口冲击强度分别为 15.05, 9.98, 10.42 kJ/m², 是纯 PE-HD 的 2.32, 1.54, 1.60 倍。GNP+MWCNT 填料的加入, 可提高 3 种纳米复合材料的拉伸强度和弯曲强度。

(4) 冲击韧性提高的原因在于 MWCNT 和 GNP 在 PE-HD 基体中分散较好, 协同诱发 PE-HD 基体产生明显的屈服。

参考文献

- [1] Wang Jianfeng, Jin Xiuxiu, Li Chunhai, et al. Graphene and graphene derivatives toughening polymers: Toward high toughness and strength[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 370:831-854.
- [2] Lyu Fucheng, Wang Yifei, Song Yao, et al. A facile rheological approach for the determination of “super toughness point” of nylon1212 / POE-g-MAH / MWCNT nanocomposites[J]. Composites Science and Technology, 2019, 177:73-80.
- [3] Tripathi S N, Rao G S S, Mathur A B, et al. Polyolefin / graphene nanocomposites: A review[J]. RSC Advances, 2017, 7(38):23 615-23 632.
- [4] Wang Quan, Wang Yuming, Meng Qingguo, et al. Preparation of high antistatic HDPE / polyaniline encapsulated graphene nanoplatelet composites by solution blending[J]. RSC Advances, 2017, 7(5):2 796-2 803.
- [5] Jin Xiuxiu, Wang Jianfeng, Dai Lunzhi, et al. Flame-retardant poly(vinyl alcohol) / MXene multilayered films with outstanding electromagnetic interference shielding and thermal conductive performances[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 380:doi.10.1016/j.cej.2019.122475.
- [6] Jin Xiuxiu, Wang Jianfeng, Dai Lunzhi, et al. Largely enhanced thermal conductive, dielectric, mechanical and anti-dripping performance in polycarbonate / boron nitride composites with graphene nanoplatelet and carbon nanotube[J]. Composites Science and Technology, 2019, 184:doi.10.1016/j.compscitech.2019.107862.
- [7] Wang Yifei, Lyu Fucheng, Song Yao, et al. A facile rheological approach for the evaluation of “super toughness point” of compatibilized HDPE / MWCNT nanocomposites[J]. Polymer Testing, 2020, 81:106280.
- [8] Qiu Feng, Hao Yongbo, Li Xiaoyun, et al. Functionalized graphene sheets filled isotactic polypropylene nanocomposites[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 71:175-183.
- [9] Liu Tian, Eyler A, Zhong Weihong. Simultaneous improvements in wear resistance and mechanical properties of UHMWPE nanocomposite fabricated via a facile approach[J]. Materials Letters, 2016, 177:17-20.
- [10] 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.
- [11] Han Zhidong, Fina A. Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review[J]. Progress in Polymer Science, 2011, 36:914-944.
- [12] Wegrzyn M, Galindo B, Benedito A, et al. Morphology, thermal, and electrical properties of polypropylene hybrid composites co-filled with multi-walled carbon nanotubes and graphene nanoplatelets[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(46):doi:10.1002/app.42793.
- [13] 郑余晨, 俞科静, 钱坤, 等. 碳纳米管 / 酸化石墨烯杂化材料及其环氧树脂复合材料拉伸力学性能的研究 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2013(2):69-73. Jia Yuchen, Yu Kejing, Qian Kun, et al. Study on tensile properties of carbon nanotubes / acidification graphene hybrid materials and epoxy resin composites[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2013(2):69-73.
- [14] 王卫芳, 陆宝山, 耿哲. 环氧树脂 / 石墨烯 / 多壁碳纳米管复合材料力学性能研究 [J]. 塑料科技, 2019, 47(7):24-27. Wang Weifang, Lu Baoshan, Geng Zhe. Study on mechanical properties of EP / GNP / MWCNT composites[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(7):24-27.
- [15] 吴俊青, 俞科静, 钱坤. 碳纳米管 / 石墨烯杂化材料改性环氧树脂研究 [J]. 工程塑料应用, 2015, 43(3):25-29. Wu Junqing, Yu Kejing, Qian Kun. Study on epoxy resin composites modified with carbon nanotubes / graphene hybrid materials[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(3):25-29.
- [16] Wang Quan, Wang Tinglan, Wang Jikui, et al. Preparation of antistatic high-density polyethylene composites based on synergistic effect of graphene nanoplatelets and multi-walled carbon nanotubes[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2018, 29(1):407-416.
- [17] Nijenhuis T K, Winter H H. Mechanical properties at the gel point of a crystallizing poly(vinyl chloride) solution[J]. Macromolecules, 1989, 22(1):411-414.