

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.07.007

增容剂含量对PP/PA66原位微纤复合材料 微观形态和性能的影响

姜林,曹尚刚,刘鸣飞,薛平

(北京化工大学塑料机械及工程研究所,北京 100029)

摘要:为解决聚丙烯(PP)/尼龙66(PA66)原位微纤复合材料(MFC)中PA66微纤与基体PP两相间因相容性差导致的力学性能存在局限性的问题,采用一次挤出熔融、二次挤出拉伸的方法通过加入马来酸酐接枝聚丙烯(PP-g-MAH)增容剂制备了PP/PA66/PP-g-MAH MFC。通过傅里叶变换红外光谱表征揭示了原位增容反应,并通过与普通PP/PA66/PP-g-MAH共混物扫描电子显微镜图对比,分析了增容剂含量对形成微纤形貌的作用及影响。探究了增容剂含量对MFC的结晶性能以及力学性能的影响。结果表明,PA66微纤可作为PP基体的非均相成核剂且PP-g-MAH也对基体起到异相成核的作用;当PP-g-MAH质量分数为3%时,MFC的拉伸性能与弯曲性能达到最佳,其值分别为41.36 MPa和54.73 MPa,比未增容的MFC提高了21.80%和13.14%,当增容剂质量分数为9%时,MFC的缺口冲击强度最佳达到了9.98 kJ/m²。证明了在MFC中加入适量的增容剂,可达到改善分散相与基体间界面相容性的效果,进而提高了MFC的力学性能。

关键词: 尼龙66;微纤形貌;增容剂;增容反应;力学性能;结晶行为

中图分类号: TQ325.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)07-0038-07

Effect of Compatibility Content on Micromorphology and Properties of PP/PA66 in-situ Microfiber Composites

Jiang Lin, Cao Shanggang, Liu Mingfei, Xue Ping

(Institute of Plastic Machinery and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract : In order to solve the problem of limited mechanical properties caused by poor compatibility between polyamide 66 (PA66) microfiber and matrix polypropylene (PP) in PP/PA66 in-situ microfiber composite (MFC), PP/PA66/malefic anhydride grafted polypropylene (PP-g-MAH) MFC was prepared by adding PP-g-MAH compatibility by primary extrusion melting and secondary extrusion stretching. The in-situ compatibilization reaction was revealed by Fourier transform infrared spectroscopy, and the effect and influence of the compatibility content on the formation of microfibril morphology were analyzed by comparison with the scanning electron microscope diagram of the common PP/PA66/PP-g-MAH blend. The effect of compatibility content on the crystallization and mechanical properties of MFC was explored. The results show that PA66 microfiber can be invoked as a heterogeneous nucleating agent for PP matrix, and PP-g-MAH also plays a heterogeneous nucleation role on the matrix. When the mass fraction of PP-g-MAH is 3%, the tensile properties and bending properties of MFC reach the best, the strength values are 41.36 MPa and 54.73 MPa, respectively, which are 21.80% and 13.14% higher than that of unenclosed MFC, and the notch impact strength of MFC reaches 9.98 kJ/m² when the compatibility content is 9%. It is proved that adding an appropriate amount of compatibility to MFC can achieve the effect of improving the interface compatibility between the dispersed phase and the matrix, thereby improving the mechanical properties of MFC.

Keywords : polyamide 66 ; microfibril morphology ; compatibility ; compatibilization reaction ; mechanical property ; crystallization behavior

通信作者: 薛平,研究员/博导,主要研究方向为聚合物高端加工装备成型原理及集成技术

收稿日期: 2023-06-02

引用格式: 姜林,曹尚刚,刘鸣飞,等.增容剂含量对PP/PA66原位微纤复合材料微观形态和性能的影响[J].工程塑料应用,2023,51(7):38-44.

Jiang Lin, Cao Shanggang, Liu Mingfei, et al. Effect of compatibility content on micromorphology and properties of PP/PA66 in-situ microfiber composites[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(7): 38-44.

在过去的几十年里,热塑性聚合物基复合材料因其优异的力学性能得到了广泛的应用,在复合材料领域已经取得了巨大的研究进展^[1]。随着各行各业对性能更优的新材料的需求不断增加,聚合物-聚合物复合材料越来越受到研究人员的广泛关注^[2]。开发新材料的关键不仅在于聚合物本身的合成,还在于对现有聚合物的改性,最常用的改性方法是将不同性能的聚合物进行共混,这是制造优异性能新材料的最简单方法。但是不同聚合物的共混物在性能提高方面往往存在一定的局限性,这是由于当热力学不相容时,聚合物共混物分离成两个或更多相,从而产生带有缺陷的相界面导致较差的实际性能^[3]。为了克服不相容的问题,通常采用两种不同的方法:第一种是向这些共混物中加入增容剂;第二种是将共混物原位转化为微纤维复合材料(MFC)。MFC的概念是由Fakirov及其同事在20世纪90年代提出的^[4],MFC的形成包括三个加工步骤:通过双螺杆挤压熔融共混;通过冷拉伸进行原位成纤;以及通过注塑或挤压进行各向同性化^[5]。影响任何纤维增强复合材料的一个重要因素是基体和纤维之间的界面相互作用,因为施加在复合材料上的载荷是通过纤维-基体界面传递的。MFC概念依赖于聚合物成分的不相容性,不同的研究人员提出了使用增容剂来改善基体与微纤维界面以及复合材料的力学性能。Ahmadlouydarab等^[6]研究了聚丙烯/再生聚对苯二甲酸乙二酯(PP/r-PET)共混物与不同质量分数的马来酸酐接枝聚丙烯(PP-g-MAH)的相容性。结果表明,PP-g-MAH提高了PP/r-PET共混物的相容性并提高了其力学性能。Eirck等^[7]研究了马来酸酐接枝线性低密度聚乙烯(PE-LLD-g-MAH)作为增容剂对PA6/PE-LLD共混物流变性能、热性能、力学性能和形貌的影响,结果表明,添加PE-LLD-g-MAH作为增容剂后,PE-LLD在PA6基体中的分布和分散性更好,共混物力学性能和热性能显著改善。Chiu等^[8]研究了增容剂马来酸酐接枝聚乙烯辛烯弹性体(POE-g-MAH)对PP/PET共混物MFC性能的影响,结果表明POE-g-MAH的添加改善了共混物的分散相形态,提高了共混物的加工性能和韧性。PET相玻璃化转变温度的变化和增容共混物熔体黏度的增加表明,由功能增容剂诱导的PP和PET分散相之间的相互作用增强。

PA66作为常用的工程塑料,具有较高的强度和

硬度,与PP为热力学不相容的两种聚合物可共混制备微纤复合材料。对于PP/PA66 MFC已有较多的研究^[9-10],但使用增容剂对该体系进行增容并探究微纤形貌及复合材料性能的报道较少。所以笔者以PP-g-MAH作为增容剂,制备了PP/PA66/PP-g-MAH MFC。探究加入增容剂后两相间发生的原位增容反应以及增容剂含量对微纤形貌的影响,还通过相关测试分析增容剂含量对MFC的结晶行为和力学性能的影响。为制备更高性能的PP/PA66体系MFC提供指导。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PP:F401,扬子石化公司;

PA66:FYR27,河南神马尼龙化工有限公司;

PP-g-MAH:CMG9801-GS,东莞明朗塑化有限公司。

1.2 主要设备及仪器

同向双螺杆挤出机:TE-2220型,扬州艾驰橡塑机械有限公司;

高速搅拌机:SHR-25 A型,张家港永利机械有限公司;

注塑机:TTI-90 F2型,东莞东华机械有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC214型,德国耐驰公司;

场发射扫描电子显微镜(FESEM):AJSM-F100型,日本电子株式会社;

万能试验机:KXWW-20C型,承德泰鼎有限公司;

电子冲击试验机:KXJJ-50 A型,承德泰鼎有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet 6700型,赛默飞世尔(中国)科技有限公司。

1.3 试样制备

(1) PP/PA66/PP-g-MAH共混物的制备。

将干燥好的PA66与PP,PP-g-MAH按不同质量比(15/85/1,15/85/3,15/85/6,15/85/9)预混合后加入到同向双螺杆挤出机中进行熔融共混,加工温度为275℃,螺杆转速为150 r/min,并挤出造粒。将干燥好的不同增容剂含量的共混颗粒分别加入到注塑机中注射成型,注塑温度为210℃,得到不同增容剂含量下的PP/PA66/PP-g-MAH共混物测试样条。

(2) PP/PA66/PP-g-MAH MFC的制备。

将干燥好的不同增容剂含量的共混颗粒再次加入到同向双螺杆挤出机中进行熔融挤出,加工温度为245℃,螺杆转速为35 r/min,同时调整牵引机牵引速度得到冷拉伸比(λ)为4的细丝并切粒,最后将不同增容剂含量下的拉伸颗粒加入到注塑机中注射成型,注塑温度为210℃,得到不同增容剂含量下的PP/PA66/PP-g-MAH MFC测试样条。

1.4 测试与表征

(1) SEM测试。

取一段PP/PA66/PP-g-MAH共混物测试样条和PP/PA66/PP-g-MAH MFC测试样条(均由铜网包覆),在煮沸的140℃二甲苯中浸泡30 min去除部分基体PP,将两种测试样条真空喷金,观察不同增容剂含量下共混物与MFC中分散相PA66与基体PP的形态。

(2) DSC测试。

测试复合材料中基体和分散相的热性能:称量6~10 mg PP/PA66/PP-g-MAH MFC颗粒样品,以10℃/min的加热速率从20℃加热到目标温度280℃,然后再以10℃/min的下降速率降温到20℃,再次加热升温到280℃,实验过程始终在N₂的保护下进行。

(3) FTIR测试。

为了分析基体PP和分散相PA66在增容剂PP-g-MAH的作用下发生的接枝反应,将纯PA66颗粒、纯PP-g-MAH颗粒和PP/PA66/PP-g-MAH(85/15/3)MFC粒料在195℃下经热压机热压成薄膜,使用分辨率为4 cm⁻¹的FTIR仪测试,取16次扫描的平均光谱分析单个组分及复合材料,扫描范围为4 000~500 cm⁻¹。

(4)力学性能测试。

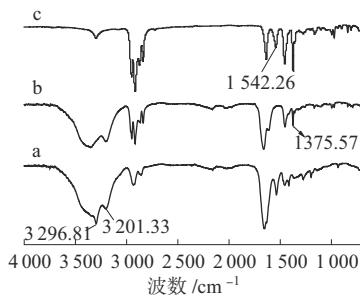
拉伸强度按照GB/T 1040.2-2006测试,测试样条尺寸为150 mm×10 mm×4 mm,跨距为100 mm;弯曲强度按照GB/T 9341-2008测试,测试样条尺寸为100 mm×10 mm×4 mm,跨距为64 mm;冲击性能按照GB/T 1843-2008测试,缺口类型为A型,以上测试均选取5个试样,且在室温25℃的条件下进行。

2 结果与讨论

2.1 原位增容反应的FTIR表征

基体PP是非极性结晶塑料,而分散相PA66是极性聚合物,通过添加增容剂PP-g-MAH来改善两

者的相容性。使用FTIR仪对PA66颗粒、PP-g-MAH颗粒以及PP/PA66/PP-g-MAH MFC进行测试,结果如图1所示。



a—PA66;b—PP-g-MAH;c—PP/PA66/PP-g-MAH MFC

图1 PA66,PP-g-MAH,PP/PA66/PP-g-MAH MFC的FTIR谱图

从图1可以看出,PA66中酰胺基团(N—H)的吸收带位于3 201.33 cm⁻¹和3 296.81 cm⁻¹,PP-g-MAH中环氧基团(C—O—C)的吸收带位于1 375.57 cm⁻¹,而在PP/PA66/PP-g-MAH MFC中在1 542.26 cm⁻¹处出现的官能团(C—N—C)表明PA66的酰胺基团与PP-g-MAH的环氧基团发生了反应,反应机理如图2所示。由此可以推断,PP-PA66嵌段物是在MAH的作用下由PP和PA66接枝而成的,这也证实了增容剂的存在使基体与分散相的界面关系发生改变。

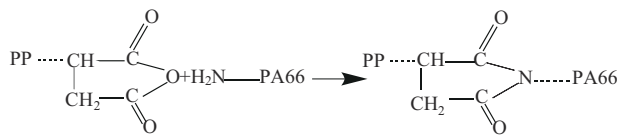
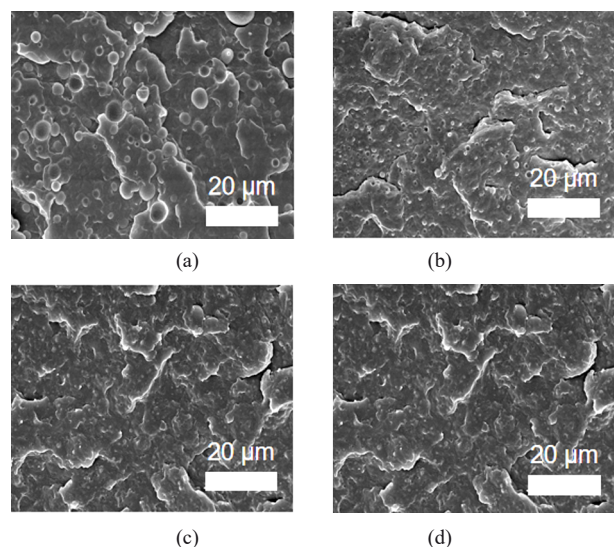


图2 PP-g-MAH中马来酸酐端基与PA66中酰胺基团机理反应

2.2 PP/PA66/PP-g-MAH共混物与PP/PA66/PP-g-MAH MFC中分散相的形貌特征

图3为不同增容剂含量下PP/PA66/PP-g-MAH共混物的低温断面SEM图。由图3a可以看出,当加入的增容剂质量份为1份时,分散相和基体成明显的两相结构;当增容剂的质量份增加到3份和6份时,容易观察到分散相PA66的颗粒尺寸在逐渐变小,两相之间的界面形貌没有棱角分明,并且分散相在基体中分布得更加均匀,这是因为添加PP-g-MAH可提高PA66与PP之间的黏度比,降低界面张力^[11],使未拉伸共混物中PA66相的尺寸趋于减小^[12],同时又起到了提高界面相容性的作用;当增容剂质量分数达到9%时,分散相完全被基体所包覆,两相分子链相互交错,但这一现象不利于后续分散相拉伸成纤的。

图4为不同含量增容剂下PP/PA66/PP-g-MAH



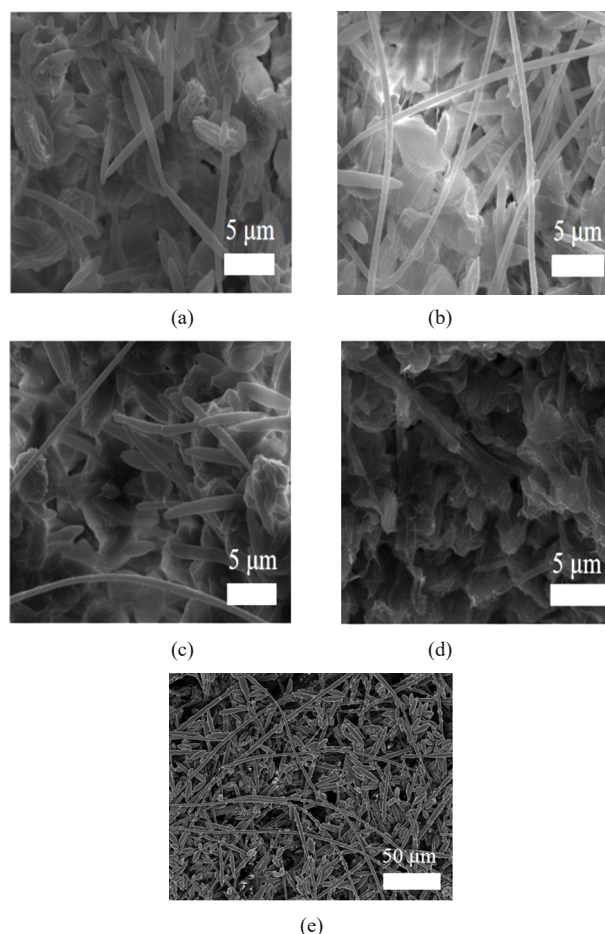
PP-g-MAH质量份:a—1;b—3;c—6;d—9

图3 不同增容剂质量分数下PP/PA66/PP-g-MAH共混物SEM图

MFC经二甲苯煮沸抽提的SEM图。当增容剂质量份为1份时,所形成的微纤(图4a)较未添加增容剂的微纤(图4e)更为纤细,这是因为当无增容剂加入时,由于PP与PA66是热力学不相容的,两相界面黏结力较低,当复合材料受到拉伸时,会导致基体与分散相发生相对滑移,阻碍微纤的进一步拉伸变形,当加入增容剂时,界面黏结力增大,两相间摩擦力变大促使分散相液滴更好地拉伸变形。当增容剂含量增加到3份时,两相间界面黏结力进一步增大,在拉伸时产生了大量的高纵横比纤维。当增容剂含量增加到6份时,所形成大部分为短微纤,这源于PP-g-MAH的影响。首先,增容剂使界面张力降低,PA66液滴变小,进而形成细短的微纤维,这些细短的微纤维容易断裂;其次,PP-g-MAH在混合过程中包裹在PA66液滴表面^[6],在拉伸过程中阻止了液滴的聚结^[13],降低了PA66微纤维聚结的可能性。当增容剂到9质量份时,分散相在基体中无法形成微纤,这是因为过多的化学反应使两相界面间更多分子链相互结合致使分散相完全被基体包覆住,界面黏结力更强,阻碍了分散相液滴的变形。因此,只有加入适量的增容剂才会有助于微纤的形成。

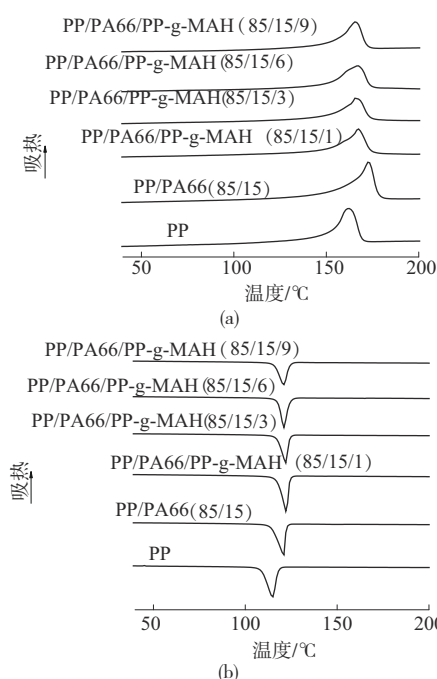
2.3 PP/PA66/PP-g-MAH MFC的结晶性能

图5是PP/PA66/PP-g-MAH MFC在不同增容剂含量下的熔融曲线与结晶曲线。表1列出了纯PP与PP/PA66/PP-g-MAH MFC的熔融温度(T_m)、结晶峰温度(T_c)、结晶起始温度(T_0)以及结晶度(X_c)。由表1可知,纯PP的 T_c , T_0 和 X_c 分别为114.90, 121.07 °C, 41.69%, 而PP/PA66 MFC的 T_c , T_0 和 X_c 为121.50,



PP-g-MAH质量份:a—1;b—3;c—6;d—9;e—0

图4 不同增容剂含量下PP/PA66/PP-g-MAH MFC的SEM照片



a—熔融曲线;b—结晶曲线

图5 不同增容剂含量下PP/PA66/PP-g-MAH MFC的DSC曲线

126.43 °C, 48.03%, 相比之下有明显的提高, 这说明 PA66 微纤可以作为 PP 基体的非均相成核剂^[14], 有异相成核的作用并且诱导晶体横向生长^[15]。当加入 PP-g-MAH 增容剂时, T_c , T_0 和 X_c 进一步提高至 126.90, 132.74 °C, 52.78%, 这是因为少量增容剂的加入提高了两相间的界面相容性, 在拉伸过程中促使 PA66 微纤具有更大的纵横比, 进而为 PP 相提供了更多的异相成核位点^[16], 促进了 PP 晶体的成核与生长。随着 PP-g-MAH 增容剂含量的增加, MFC 的 T_c , T_0 和 X_c 反而有所下降, 其主要的原因一是过高含量的增容剂在共混过程中将 PA66 相完全包覆, 使 PA66 液滴在拉伸过程中无法聚结形成大液滴进而无法拉伸成大纵横比的微纤, 这就减弱了微纤对 PP 相的异相成核作用; 二是包覆在 PA66 相的 PP-g-MAH 使 PA66 与 PP 发生接枝反应, 使相界面间生成了分子链较长的大分子, 阻碍了 PP 分子向 PA66 相表面扩散, 导致结晶速率降低^[17]。结合图 5a 与表 1 可发现, PP/PA66/PP-g-MAH MFC 的熔融温度并没有较大的变化也没有明显的变化规律, 这可能是因为 PP/PA66/PP-g-MAH MFC 中 PP 相的快速结晶导致晶体的完整度下降以及更高的结晶温度使 PP 晶体拥有更大的片晶厚度所致。

表 1 PP/PA66/PP-g-MAH MFC 的熔融结晶性能

PP/PA66/PP-g-MAH 质量比	$T_m/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$T_0/^\circ\text{C}$	$X_c/\%$
100/0/0	162.40	114.90	121.07	41.69
85/15/0	162.80	121.50	126.43	48.03
85/15/1	163.80	126.90	132.74	52.78
85/15/3	163.70	126.60	130.69	50.94
85/15/6	162.70	124.20	128.23	51.73
85/15/9	163.00	123.50	127.12	50.81

2.4 PP/PA66/PP-g-MAH 共混物与 PP/PA66/PP-g-MAH MFC 的力学性能

图 6 是不同 PP-g-MAH 含量下 PP/PA66/PP-g-MAH 共混物与 PP/PA66/PP-g-MAH MFC 的力学性能。通过图 6a 可以发现, 虽然两种材料含有相同的物料组分比例, 但拉伸强度却相差很大。这是因为在含有液滴状分散相的复合材料中, 由于缺乏两相间的相互作用和较低的附着力, 分散相与基体之间的界面在伸长时会出现空腔。相比之下, 在具有高长径比纤维的 MFC 中, 微纤维与基体之间的界面面积足够大, 改善了组分之间的界面接触。在这种情况下, 基体将在拉伸过程中通过产生摩擦力对纤维施加压力, 这将阻碍复合材料的变形, 导致有限的

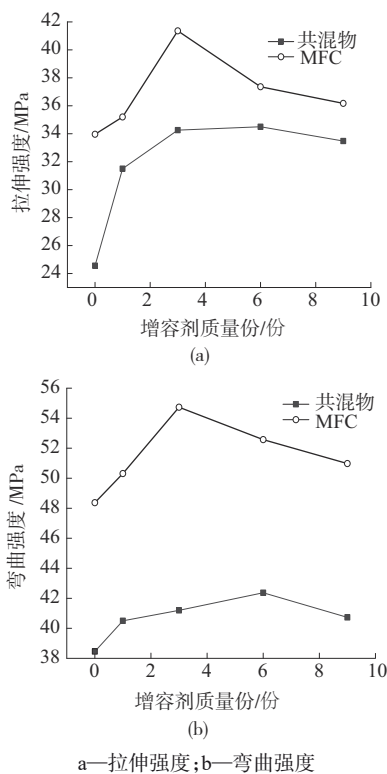


图 6 不同增容剂含量下 PP/PA66/PP-g-MAH 共混物与 PP/PA66/PP-g-MAH MFC 的力学性能

空化形成和较小的伸长形变^[18]。

其次观察图 6a 中 PP/PA66/PP-g-MAH MFC 拉伸强度的变化可以发现, 相较于无增容剂添加的 PP/PA66 MFC, 添加质量份为 1 份的 PP-g-MAH 对 PP/PA66/PP-g-MAH MFC 的拉伸强度已经有明显的增强作用, 且随着 PP-g-MAH 含量的增加, 拉伸强度呈现出先增大后减小的趋势, 当增容剂质量份为 3 份时, PP/PA66/PP-g-MAH MFC 的拉伸性能最好, 其最大拉伸强度为 41.36 MPa, 比无增容剂加入的 PP/PA66 MFC 增加了 21.8%, 比 PP/PA66/PP-g-MAH 共混物增加了 68.4%。MFC 的概念依赖于基体与分散组分之间的不相容性, 最终的力学性能取决于增强体的纵横比和基体与增强体之间的界面粘附力^[19]。增容剂质量份为 3 份时, PP/PA66/PP-g-MAH MFC 的拉伸性能达到最佳的原因是复合材料中大纵横比的 PA66 微纤对其提供了增强效果, 其次 PP-g-MAH 的加入使 PP 与 PA66 发生接枝反应增强了相界面的连接, 提高了两相的相容性, 有利于 MFC 在拉伸过程中应力的传递^[20], 减弱了增强相与基体间的滑移。随着增容剂质量分数的增加, 增强相被 PP-g-MAH 完全包覆, 在拉伸过程中 PA66 液滴无法聚结变大, 致使拉伸后所形成的微纤纵横比较小。

虽然基体与增强体之间的界面粘附力进一步增强,但远不及微纤形态对MFC力学性能的影响,所以增容剂质量的增加反而使MFC的拉伸强度减弱。

图6b为不同增容剂含量下PP/PA66/PP-g-MAH共混物和PP/PA66/PP-g-MAH MFC的弯曲强度。PP-g-MAH增容剂对PP/PA66/PP-g-MAH MFC的弯曲强度有明显的增强作用^[21],且变化趋势与拉伸强度呈现一致性,当PP-g-MAH质量分数为3%时,PP/PA66/PP-g-MAH MFC的弯曲性能最好,最大弯曲强度为54.73 MPa,比无增容剂加入的PP/PA66 MFC增加了13.14%,比PP/PA66/PP-g-MAH共混物增加了42.3%。

聚合物韧性以冲击强度的形式展现,是衡量材料或制品承受突然载荷而不“失效”的能力的指标^[22]。图7是不同增容剂含量下PP/PA66/PP-g-MAH共混物和PP/PA66/PP-g-MAH MFC的缺口冲击强度。从图7可以看出,随着PP-g-MAH质量分数的增加,共混物和MFC的缺口冲击强度也随之增大。这可以解释为由于接枝反应的发生,提高了微纤与基体之间的界面黏附性,虽然在PP-g-MAH质量分数较高的MFC中形成的纤维较短,但它们可以通过更好地耗散冲击能量使MFC具有较高的冲击性能。

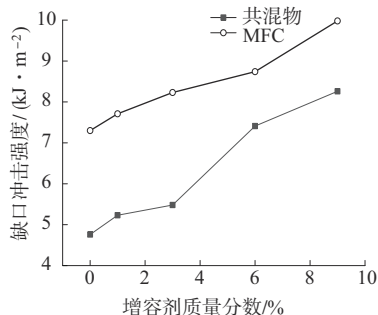


图7 不同增容剂含量下PP/PA66/PP-g-MAH共混物与PP/PA66/PP-g-MAH MFC的缺口冲击强度

3 结论

(1)由FTIR谱图可以看出,通过加入PP-g-MAH可以使PP与PA66发生接枝反应,证实了增容剂的存在使基体与分散相界面关系发生改变,两相间的相容性得到提高并且增强了界面间的黏附性。

(2)由SEM图可以发现,在PP/PA66共混物中加入增容剂时,随着增容剂含量的增加,PA66液滴尺寸逐渐减小,当增容剂质量份为9份时,PA66相被PP基体完全包覆至难以分辨形貌;在PP/PA66/PP-g-MAH MFC中,当增容剂含量较低时,由于界面的

黏结力增大,两相间摩擦力变大促使了高纵横比微纤的形成,随着增容剂含量的增加,PA66相被PP-g-MAH所包覆阻碍了聚结,形成了短小且分布不均匀的微纤,当增容剂质量分数为9%时,PA66在PP基体中无法形成微纤。

(3)通过PP/PA66/PP-g-MAH MFC与纯PP的热性能参数对比,发现PA66微纤可以作为PP基体的非均相成核剂,起到异相成核的作用。当有较低质量的增容剂加入时,高纵横比的微纤为PP相提供了更多的异相成核位点,促进了PP晶体的成核与生长;当增容剂含量增加时,微纤质量下降,相界面间形成分子链较长的大分子阻碍了PP分子向PA66相表面扩散,导致结晶速率降低。

(4)随着增容剂含量的增加,PP/PA66/PP-g-MAH MFC的缺口冲击强度持续增大,而其拉伸强度与弯曲强度则呈现出先增大后减小的趋势,这种变化趋势与PA66微纤形貌随增容剂质量的变化密切相关。当增容剂质量份为3份时,其拉伸性能与弯曲性能达到最佳,其分别为41.36 MPa, 54.73 MPa。

参考文献

- [1] Wu Chenchun, Xu Fan, Wang Huixiong, et al. Manufacturing technologies of polymer composites—A review[J]. *Polymers*, 2023, 15 (3):712–737.
- [2] Fakirov S. Nano- and microfibrillar single-polymer composites: A review[J]. *Macromol Mater Eng*, 2013, 298. DOI: 10.1002/mame.201200226.
- [3] Julia Higgins S, Jane Lipson E G, Ronald White P. A simple approach to polymer mixture miscibility[J]. *Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2010, 368(1 914):1 009–1 025.
- [4] Evstatiev M, Fakirov S. Microfibrillar reinforcement of polymer blends[J]. *Polymer*, 1992, 33(4):877–880.
- [5] Jayanarayanan K, Thomas S, Joseph K. Effect of compatibilizer on the morphology development, static and dynamic mechanical properties of polymer-polymer composites from LDPE and PET[J]. *International Journal of Plastics Technology*, 2015, 19(1):1–22.
- [6] Ahmadiouydarab M, Chamkouri M, Chamkouri H. Compatibilization of immiscible polymer blends (R-PET/PP) by adding PP-g-MA as compatibilizer: Analysis of phase morphology and mechanical properties[J]. *Polymer Bulletin*, 2019, 77:5 753–5 766.
- [7] dos Anjos I E G R, Backes E H, Marini J, et al. Effect of LLDPE-g-MA on the rheological, thermal, mechanical properties and morphological characteristic of PA6/LLDPE blends[J]. *Journal of Technology & Science*, 2019, 26(134):1–10.
- [8] Chiu H T, Hsiao Y K. Compatibilization of poly(ethylene tere-

- phthalate)/polypropylene blends with maleic anhydride grafted polyethylene-octene elastomer[J]. *Polym Res*, 2006, 13(2):153–160.
- [9] 姜林,曹尚刚,刘鸣飞,等.分散相含量对PP/PA66原位微纤复合材料微观形态和性能的影响[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(1):22–27, 33.
- Jiang Lin, Cao Shanggang, Liu Mingfei, et al. Effect of dispersed phase content on microfiber morphology and properties of PP/PA66 in situ microfiber composites[J]. *Engineering Plastics Applications*, 2023, 51(1):22–27, 33.
- [10] 沈经纬,黄文艺,陈晓梅. PP/PA66原位复合材料的增强和增韧效应[J]. *高分子学报*, 2003(2):278–282.
- Shen Jingwei, Huang Wenyi, Chen Xiaomei. Reinforcement and toughening effects of PP/PA66 in situ composites[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2003(2):278–282.
- [11] 隋永波.增容剂对PP/PA66共混体系性能影响的DPD仿真分析[J]. *塑料科技*, 2020, 48(2):127–130.
- Sui Yongbo. DPD simulation analysis of the effect of compatibilizer on the performance of PP/PA66 blending system[J]. *Plastics Science and Technology*, 2020, 48(2):127–130.
- [12] Yi Xin, Xu Ling, Wang Yuling, et al. Morphology and properties of isotactic polypropylene/poly(ethylene terephthalate) in situ microfibrillar reinforced blends: Influence of viscosity ratio[J]. *European Polymer Journal*, 2009, 46(4):719–730.
- [13] Xu Ling, Zhong Ganji, Ji Xu, et al. Crystallization behavior and morphology of one-step reaction compatibilized microfibrillar reinforced isotactic polypropylene/poly(ethylene terephthalate) (iPP/PET) blends[J]. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2011, 29(5):540–551.
- [14] Quan Hui, Li Zhongming, Yang Mingbo, et al. On transcrystallinity in semi-crystalline polymer composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 65(7):1 000–1 021.
- [15] Varga J, Kocsis J K. The difference between transcrystallization and shear-induced cylindritic crystallization in fibre-reinforced polypropylene composites[J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2004, 13(14):1 069–1 071.
- [16] 卢淑霞,周红军,倪雪芬,等.增容剂对PP/PA66共混物力学性能和结晶行为的影响[J]. *塑料科技*, 2014, 42(5):62–66.
- Lu Shuxia, Zhou Hongjun, Ni Xuefen, et al. Effect of compatibilizer on mechanical properties and crystallization behaviors of PP/PA66 blends[J]. *Plastics Science and Technology*, 2014, 42(5):62–66.
- [17] Xu Ling, Zhong Ganji, Ji Xu, et al. Crystallization behavior and morphology of one-step reaction compatibilized microfibrillar reinforced isotactic polypropylene/poly(ethylene terephthalate) (iPP/PET) blends[J]. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2011, 29(5):540–551.
- [18] Chen Y H, Zhong G J, Li Z M. Microfibril reinforced polymer-polymer composites via hot stretching: Preparation, structure and properties[J]. *Synth Polym Compos*, 2012. DOI: 10.3139/9781569905258.012.
- [19] Fuchs C, Bhattacharyya D, Fakirov S. Microfibril reinforced polymer-polymer composites: Application of Tsai-Hill equation to PP/PET composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2005, 66(16):3 161–3 171.
- [20] 王玉,孙文杰,马玉录,等.增容作用对PP/PA6原位微纤复合材料形貌及性能的影响[J]. *中国塑料*, 2021, 35(5):1–5.
- Wang Yu, Sun Wenjie, Ma Yulu, et al. Effect of compatibilizer on morphology and performance of PP/PA6 microfibrillar composites[J]. *China Plastics*, 2021, 35(5):1–5.
- [21] Cheng Linghe, Wang Wanjie, Wang Jingwu, et al. Morphological structure and mechanical properties of in situ microfibrillar composites of modified PA66 with PP[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 127(5):1–8.
- [22] William G P. Polymer toughness and impact resistance[J]. *Polymer Engineering & Science*, 1999, 39(12):2 445–2 460.