

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.09.007

纳米蒙脱土对 PBT/PET/GF 复合材料结晶和力学性能的影响

郑樑¹, 曹巍², 周安²

(1. 上汽大众汽车有限公司, 上海 201805; 2. 苏州旭光聚合物有限公司, 江苏苏州 215129)

摘要:以滑石粉、纳米蒙脱土(MMT)、无机有机混合成核剂 P250 作为成核剂,通过熔融共混加入质量分数 50% 玻璃纤维增强聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)/聚对苯二甲酸乙二酯(PET)复合材料(PBT/PET/GF50)中,对比发现纳米 MMT 能够明显提高材料的拉伸强度。采用拉伸试验机、摆锤冲击仪、差示扫描量热(DSC)仪等研究 MMT 用量对复合材料力学性能、结晶性能的影响。结果表明,MMT 质量分数为 0.5% 时复合材料拉伸强度达到最大值 169.7 MPa,与未添加 MMT 的复合材料相比提高了 13.1%,而冲击强度仅下降 2.6%。对复合材料进行 DSC 测试发现,MMT 对 PBT 结晶的影响较小,而对 PET 结晶的影响较大,因而减缓了两者在结晶速率上的差异;与未添加 MMT 及其它 MMT 用量下的 PBT/PET/GF50 相比,添加质量分数 0.5% 的 MMT,可使复合材料结晶峰、二次升温熔融峰向高温偏移,同时使结晶峰面积变大,说明该用量的 MMT 能够有效抑制 PBT 和 PET 的酯交换反应,使复合材料得到较为完善的晶体。流变试验结果表明 MMT 质量分数为 0.5% 时有助于加工过程中 PBT/PET 分子量的保留。

关键词:聚对苯二甲酸丁二酯;聚对苯二甲酸乙二酯;玻璃纤维;纳米蒙脱土;结晶;力学性能;成核剂

中图分类号:TQ323.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2018)09-0035-06

Effect of Nano-montmorillonite on Crystallization and Mechanical Properties of PBT/PET/GF Composite

Jia Liang¹, Cao Wei², Zhou An²

(1. Shanghai Volkswagen Automotive Co. Ltd., Shanghai 201805, China; 2. Suzhou Sunway Polymer Co. Ltd., Suzhou 215129, China)

Abstract: Adding talcum powder, nano-montmorillonite (MMT), inorganic-organic nucleating agent P250 as nucleating agents into 50% glass fiber reinforced PBT/PET composite through melt-blending. By comparison, MMT is found effective on promotion of tensile strength of PBT/PET/GF50. The effects of MMT content on mechanical properties and crystallization properties of the composite were studied by tensile tester, pendulum impact tester and differential scanning calorimeter. It shows that, the tensile strength of the composite reaches 169.7 MPa when the mass fraction of MMT is 0.5%, which increases by 13.1% compared the composite without MMT, while the impact strength only decreases by 2.6%. DSC test show that, the effect of MMT on crystallization of PBT is little but is great for PET, so MMT reduces the difference of crystallization rate of PBT and PET. Compared with the composites without MMT or with other MMT contents, when the mass fraction of MMT is 0.5%, the crystallization peak and the second melting peak shift to the high temperature, and the crystallization peak area becomes larger, indicating that 0.5% MMT can effectively inhibit the transesterification reaction between PBT and PET and a relatively perfect crystal is obtained. Thereby, the rheology result shows that 0.5% MMT can contribute to the retaining of PBT/PET molecular weight in the processing.

Keywords: PBT; PET; glass fiber; nano-montmorillonite; crystallization; mechanical property; nucleating agent

聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)可经酯交换法或酯化法由对苯二甲酸和丁二醇脱水缩聚制得,是一种结晶聚合物。聚对苯二甲酸乙二酯(PET)是一种半结晶聚合物,其结构与 PET 相似,最主要区别在于主链上的亚甲基数量^[1]。结构决定了两者物性相似,

溶解度参数相近。PBT 主链上亚甲基较多,使得 PBT 链柔性好,熔点较低;而 PET 链刚性大,分子链运动迟缓,结晶温度高,结晶慢^[2]。

正因如此,PBT/PET 合金结晶时情况比较复杂,既有结晶产生的物理变化,又有酯交换反应等化

通讯作者:周安,主要研究方向为材料的复合改性 E-mail: an.zhou@xuguang.net

收稿日期:2018-06-20

引用格式:郑樑,曹巍,周安. 纳米蒙脱土对 PBT/PET/GF 复合材料结晶和力学性能的影响[J]. 工程塑料应用,2018,46(9):35-40.

Jia Liang, Cao Wei, Zhou An. Effect of nano-montmorillonite on crystallization and mechanical properties of PBT/PET/GF composite[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(9):35-40.

学变化^[3]。能够达成共识的是,由于两者结晶速率差异较大,结晶时不会生产共晶,而是分别结晶,造成两者晶相不相容^[4]。通常的做法是加入结晶促进剂加快 PET 的结晶^[5],得到更加完善的晶体,从而改善材料的宏观力学性能^[6]。常用的结晶促进剂有无机成核剂、有机成核剂和高分子成核剂几大类^[7]。无机成核剂主要是纳米矿粉、纳米二氧化硅(SiO_2)等无机微粒,这类粒子尺寸较小,不易团聚,由这些微粒作为晶核形成的晶体晶粒尺寸较小,晶体分布均匀;而有机和高分子成核剂通常是金属盐类化合物和高熔点聚合物,有机高分子往往分散较差,其优势在于与基体树脂相容性较好。张天水等^[8]对纳米 SiO_2 进行表面改性,而后分别与 PBT, PBT/PET 复合制备纳米复合材料,发现纳米 SiO_2 能有效提升 PBT 的力学性能和热变形温度,且能抑制 PBT/PET 之间的酯交换反应、对 PBT 起到异相成核作用。

适用于 PBT/PET 合金的无机成核剂除了 SiO_2 , 还有滑石粉、云母粉、蒙脱土(MMT)等矿粉以及 TiO_2 等,而适用的有机成核剂包括四氯乙烷、聚乙二醇等。笔者首先选用无机成核剂滑石粉、纳米 MMT 以及无机有机混合成核剂 P250,将其加入质量分数 50% 玻璃纤维增强 PBT/PET 复合材料(PBT/PET/GF50)中,对比了它们对复合材料的增强效果,选择效果较好的成核剂进行深入研究,探讨优选成核剂提升复合材料性能的作用机理。制备的 PBT/PET/GF50 主要应用于汽车后视镜基座,该零件对材料的拉伸强度要求比较高,所以对成核剂优劣的评判着眼于材料拉伸强度的大小。目前国内生产该零件主要依靠进口 BASF 的成品料,生产成本低、容易造成垄断,故对此类材料进行研究可推进其国产化,降低生产成本。

1 实验部分

1.1 主要原料

PBT: 1100A, 苏州正瑞塑胶科技有限公司;

PET: SD500, 扬州华光橡塑新材料有限公司;

玻璃纤维: E7CS10-03-534AYF, 巨石集团有限公司;

纳米 MMT: Clay 20, 上海壮景化工有限公司;

滑石粉: HTPULTRA 5L, 辽宁爱海意米矿业有限公司;

无机有机混合成核剂: P250, 德国布吕格曼助剂有限公司;

受阻酚抗氧剂: AT-10, 瑞士汽巴精细化工有限

公司;

三元共聚增韧剂: AX8900, 苏州市海丰塑胶有限公司;

聚乙烯蜡: WE-2, 上海金山星星有限公司。

1.2 主要仪器与设备

双螺杆挤出机: ZE25 型, 德国 Bestoff 公司;

塑料注射成型机: HTF120W1 型, 宁波海天塑机集团有限公司;

平板硫化机: XLB-Q/D350×350×2, 常州第一橡塑设备有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪: IR200 型, 赛默飞世尔科技有限公司;

拉伸试验仪: S0102 型, 德国 Zwick 集团;

摆锤冲击仪: S1107 型, 德国 Zwick 集团;

旋转流变仪: HAKKE MARS 60 型, 赛默飞世尔科技有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪: Q20 型, 美国 TA 公司。

1.3 试样制备

将 PBT, PET 置于除湿烘箱, 于 120℃ 干燥 8 h 后取出、封装备用。将 PBT, PET 按照质量比 3:1 投入高速混合机预混合 30 s, 而后加入各种助剂混合 5 min 后投入双螺杆挤出机主喂料机筒, 同时在侧喂料机筒加入足够的玻璃纤维, 按主喂料与侧喂料质量损耗比 1:1 挤出切粒后再次于除湿烘箱干燥 8 h, 然后注塑成标准试样。

挤出温度分别为: 一段 180℃, 二段 200℃, 三段 230℃, 四段 235℃, 五段 245℃, 六段 250℃, 七段 250℃, 八段 250℃, 九段 250℃, 机头段 265℃; 喂料速率 30 kg/h, 其中主喂料、侧喂料均为 15 kg/h; 螺杆转速 400 r/min。

注塑温度分别为: 一段 245℃, 二段 250℃, 三段 255℃, 四段 260℃, 射嘴 270℃; 射胶位置: 一段 45 mm, 二段 38 mm, 三段 0 mm, 四段 0 mm。

1.4 测试与表征

(1) FTIR 分析。

用平板硫化机将挤出粒子压制成为板材, 快速冷却。用该板材进行红外光谱全反射试验, 波长范围 400~4000 cm^{-1} , 扫描分辨率 16 cm^{-1} 。

(2) 力学性能测试。

拉伸性能按 ISO 527-1-2012 测试, 拉伸速率 50 mm/min; 简支梁冲击强度按 ISO 179-1-2010 测试。

(3) 结晶性能测试。

取 10~15 mg 挤出粒子进行 DSC 测试,升温或降温速率分别设为 5, 10, 20 °C / min。升温程序设为从 50 °C 升温至 300 °C, 恒温 1 min, 而后降温至 50 °C, 恒温 1 min, 再次升温至 300 °C, 得到一次升温曲线、降温结晶曲线和二次升温曲线。

(4) 动态流变测试。

将挤出粒子模压成型为 30 mm×30 mm 的样品进行动态流变测试。剪切速率从 0.1 Hz 逐渐上升至 100 Hz, 得到剪切速率与复数黏度的关系曲线。

2 结果与讨论

2.1 成核剂的选择

当应用于汽车零件上时,不添加任何成核剂的 PBT/PET/GF50 的大部分性能均满足指标,主要难点在于提高其拉伸强度,所以成核剂选择的标准是其对复合材料拉伸强度的提升程度。

图 1 是质量分数为 1% 的各成核剂 (滑石粉、纳米 MMT、P250) 对复合材料拉伸强度的影响。从图 1 不难发现,同样的添加量下纳米 MMT 效果最佳。所以以下实验均以纳米 MMT 作为成核剂,以其添加量作为变量进行深入讨论。

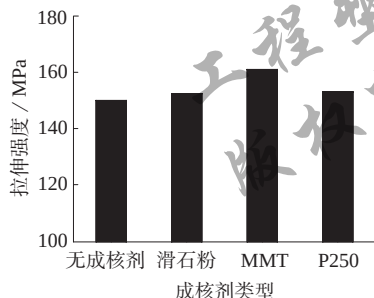
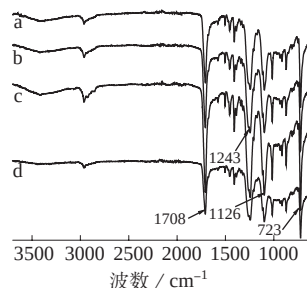


图 1 不同成核剂的 PBT/PET/GF50 的拉伸强度

2.2 FTIR 分析

图 2 是不同 MMT 用量的 PBT/PET/GF50 的 FTIR 谱图。在 PBT/PET/GF50 中,因 PBT, PET 结构相似,在 FTIR 谱图上难以区分。但从图 2 中不难发现位于 1708 cm^{-1} 处的酯键中的碳氧双键吸收峰 (与文献 [10] 描述的芳香族酯键的羰基吸收峰位于 1720 cm^{-1} 以下吻合), 位于 1243, 1126 cm^{-1} 处的为 C—O—C 伸缩振动峰, 723 cm^{-1} 处则是对位双取代苯环上氢的面外弯曲振动。受此影响,本该位于 700, 760 cm^{-1} 处的苯环上氢的面外弯曲振动峰变得不明显,但是位于 1450~1620 cm^{-1} 处的多个苯环骨架吸收峰仍然有力地证明了苯环的存在。MMT 的红外吸收峰应当是位于 1041, 1091 cm^{-1} 处的双峰,但在该体系中因与芳环上氢的面内弯曲振动重合而难以区分。此外, PBT 中的四个亚甲基会在 720 cm^{-1} 处出



MMT 质量分数: a—0%; b—0.5%; c—1%; d—1.5%

图 2 不同 MMT 用量的 PBT/PET/GF50 的 FTIR 谱图

现弱吸收峰,但同样难以分辨^[11]。

2.3 力学性能分析

在结晶体系中加入成核剂主要目的是加速体系的结晶,使其在同样的降温速率下得到更完善的晶体、更高的结晶度,从而提高材料的拉伸强度。理论上来说,结晶越快、结晶度越高,拉伸强度越高。

图 3 为不同 MMT 用量的 PBT/PET/GF50 拉伸强度。图 3 中,不加 MMT 的 PBT/PET/GF50 拉伸强度为 150 MPa,加入质量分数为 0.5% 的成核剂 MMT 后,拉伸强度提高了 19.7 MPa,提高幅度为 13.1%。从文献资料得知^[12], PBT, PET 结晶速率相差较大,两者合金晶区不相容,影响材料性能,而成核剂的加入同时提高两者的结晶速率。对 PET 来说,成核剂将有效缩减 PET 形成晶体所用时间,从而抑制两者的晶相分离,提高材料的性能;而 PBT 本身结晶速率较快,纳米 MMT 对其结晶速率的提升作用不如 PET 明显。这样两者的结晶速率差距被拉近,从而减缓晶相不相容对合金材料性能的影响。但是,随着 MMT 用量继续增加,拉伸强度反而有所下降,这与理论不相符。张天水^[8]在研究成核剂 SiO₂ 对 PBT/SiO₂ 复合材料拉伸强度的影响时,认为少量的成核剂在体系中起到异相成核作用,而过量 SiO₂ 在材料中团聚形成“岛相结构”,分散程度变差,失去了作为晶核提升结晶速率的作用,即失去了成核剂的作用,因此可以认为当 MMT 质量分数超过 0.5% 后也失去了成核剂的作用。

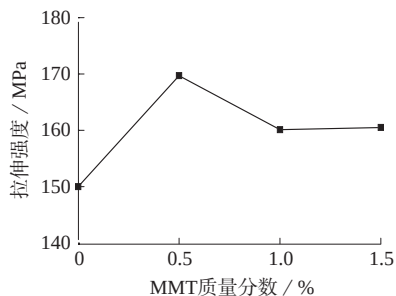


图 3 不同 MMT 用量的 PBT/PET/GF50 拉伸强度

图4为不同MMT用量的PBT/PET/GF50简支梁冲击强度。由图4看出,随着MMT用量的增加,材料冲击强度下降,这是由于MMT的加入加快材料的结晶速率,在同样的结晶时间内结晶度较高,分子链排列相对规整,晶体之间孔隙率下降且分子链柔韧性下降、链段之间缠结减少。材料受外力冲击时,柔韧性好、孔隙率大的链段通过改变构象吸收更多的能量,冲击强度较高;反之刚性高、分子链排列规整的材料冲击强度较低。但当MMT质量分数为0.5%时,复合材料的冲击强度仅略有下降,由60.5 kJ/m²下降至58.9 kJ/m²,下降幅度仅为2.6%,可以认为在此MMT用量下,材料的冲击强度基本不受影响。

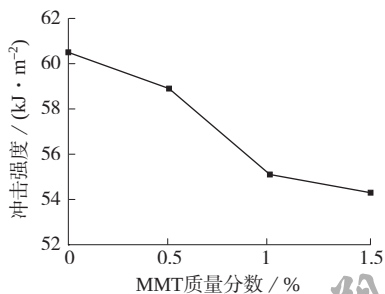


图4 不同MMT用量的PBT/PET/GF50冲击强度

2.4 结晶性能分析

对材料进行熔融-结晶-再熔融,得到不同MMT用量的PBT/PET/GF50的DSC曲线。由于添加不同用量的MMT后得到的DSC曲线趋势相似,因此仅列举了MMT质量分数为0%时不同升温速率下PBT/PET/GF50的DSC曲线,如图5所示。表1列出了不同MMT用量及不同升温速率下PBT/PET/GF50的DSC曲线中不同峰的峰值温度。图5中,峰向下的曲线为一次和二次升温曲线,峰向上的曲线为结晶曲线;其中P1, P2分别是一次升温出现的熔融峰,从表1列出的峰值来看,分别位于222℃和250℃左右;P3是降温结晶峰,位于183~195℃;P4, P5是二次升温出现的熔融峰,位于200~220℃。

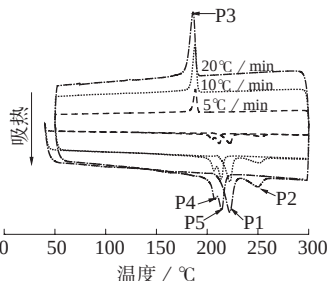


图5 未添加MMT的PBT/PET/GF50在不同升降温速率下的DSC曲线

表1 不同MMT用量及升降温速率下各DSC曲线峰值温度/℃

MMT质量分数 / %	升降温速率 / (℃·min ⁻¹)	P1	P2	P3	P4	P5
0	5	222	252	188	204	212
	10	222	252	188	206	213
	20	222	251	186	207	213
0.5	5	223	251 ¹⁾	195	209	218
	10	223	247	193	210	219
	20	223	247	191	212	220
1	5	222	250	188	205	214
	10	222	250	187	206	216
	20	222	250	183	207	216
1.5	5	222	250	188	205	214
	10	222	250	188	206	215
	20	221	250	183	206	217

注: 1) MMT质量分数为0.5%且升降温速率为5℃/min时, P2峰过小,故仪器将其忽略而未标出。

从图5可以发现,改变升降温速率,曲线趋势基本不变。结合表1不难发现,随着降温速率的上升,结晶峰向低温处偏移,这是因为晶核的形成、晶体的生长具有时间依赖性,降温速率越快,晶核越晚形成,导致结晶峰向低温处偏移。

此外,一次升温出现的P1, P2两个峰的峰值分别与PBT, PET吻合,但是经过二次升温出现的熔融峰P4, P5却是熔点较低的双峰。出现这种情况的原因是, PBT和PET在恒速升温、降温的理想条件下容易发生严重的酯交换反应^[13],两组分链段断裂、重组并生成嵌段共聚物。这些嵌段共聚物的生成破坏了规整的晶体结构,使得生成的晶体具有较低的熔点。同时,由于酯交换过程是可逆反应,在体系中各链段反应程度不一,致使反应生成的新链段长短不均匀,结晶生成的晶体规整度层次不齐,在DSC曲线上显示出双峰^[14]。

另外,由于材料在加工过程中的冷却方式是水冷,降温速率非常快,熔体在冷却过程中来不及发生酯交换反应,所以一次升温曲线得到的是两个单独的熔融峰。减少熔体在螺杆的停留时间和冷却结晶时间有助于抑制酯交换反应的发生。

图6为升温速率为5℃/min时不同MMT用量的PBT/PET/GF50的一、二次升温DSC曲线。结合表1可以发现, MMT质量分数为0%, 1%, 1.5%时, 结晶峰P3及二次升温曲线熔融峰P4的峰值温度大致相似; 而MMT质量分数为0.5%时结晶峰P3较大(见表2)且其与二次升温的熔融峰P4, P5均向高温处偏移, 同时本该位于250℃附近的PET一次升温熔融峰P2变得平缓而不明显(图6中虚线圈处)。

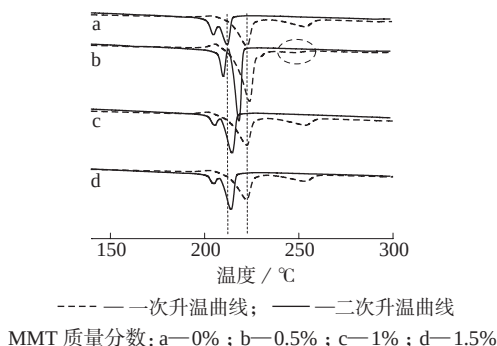


图6 升温速率为 5℃/min 时不同 MMT 用量的

PBT/PET/GF50 一、二次升温 DSC 曲线

表2 升温速率为 5℃/min 时不同 MMT 用量的

PBT/PET/GF50 结晶峰 P3 的面积

MMT 质量分数 / %	结晶峰 P3 面积
0	9.84
0.5	14.69
1	10.94
1.5	11.47

对于 PBT/PET 合金来说,两者结构相似,具有良好的相容性,但是两者结晶速率差异大,导致晶相不相容,所以一次升温曲线中两结晶峰明显分离,在体系中加入 MMT 的目的之一就是加快两者结晶速率,试图得到相容性较好的结晶体系,从而提高材料的宏观力学性能。结晶峰较大,说明形成的晶体较完善,酯交换反应形成的嵌段共聚物较少,质量分数为 0.5% 的 MMT 能有效抑制 PBT, PET 间的酯交换反应,二次升温熔点较其它用量提高同样说明这个问题。P2 峰变得平缓而 P1 变化不大,说明质量分数为 0.5% 的 MMT 对 PBT 结晶度影响不大,而使 PET 晶体变少,大部分 PET 以游离态分布在体系中。这样既使得 PET 链段分布细化,又因非晶 PBT, PET 相容性良好从而增加整体的相容性。合金在加工过程中采用水冷,熔体温度降至熔点以下的时间通常只有几秒,可以看作 PBT, PET 是同时开始结晶,所以结晶速率对晶体形成的影响较大。MMT 对 PBT, PET 都具有促进结晶的作用,加入质量分数为 0.5% 的 MMT 使得 PBT 在极短的时间内完成结晶, PBT 的结晶会占用大部分 MMT,此时尚未结晶的 PET 被“锁”在 PBT 晶相中,链段运动困难,难以形成晶体,于是成游离态分布;而随着 MMT 用量的进一步增加, PET 结晶速率显著上升,缩短了 PBT, PET 之间结晶速率的差异,在 PBT 晶相完全固定之前部分 PET 链段运动形成晶体,在一次升温曲线上又出现明显的 PET 熔融峰。

图 7 为降温速率 5℃/min 时不同 MMT 用量

的 PBT/PET/GF50 的结晶曲线。从图 7 可以发现,加入质量分数为 0.5% 的 MMT 后结晶峰向高温偏移且半高峰宽较窄。PBT, PET 结晶温度分别为 168.9℃ 和 184.9℃^[15],而 PBT/PET 合金典型的结晶温度为 167.6℃,造成合金结晶温度低于两组分的原因主要是酯交换反应。图 7 结晶峰向高温偏移,说明质量分数为 0.5% 的 MMT 主要作为结晶成核剂存在于体系中,该用量的 MMT 能够缩短结晶周期,使得 PBT/PET 在较高温度下就能形成晶体,而 MMT 质量分数超过 1% 后则倾向于作为无机填料添加剂,失去了成核作用。

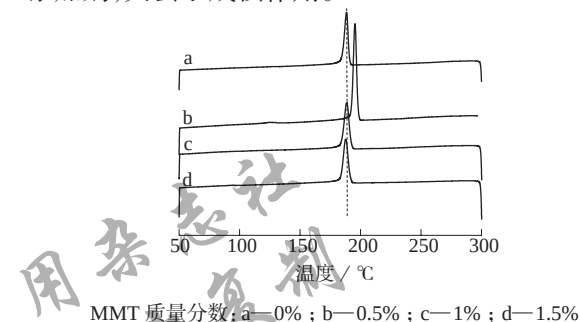


图7 降温速率为 5℃/min 时不同 MMT 用量的

PBT/PET/GF50 的结晶曲线

2.5 流变性能分析

图 8 是不同 MMT 用量的 PBT/PET/GF50 流变曲线。实验中转子剪切速率以指数形式上升,得到剪切速率与复数黏度的曲线。在低剪切速率下,材料的黏度-剪切速率曲线可以大致反映材料平均分子量的大小,黏度曲线越高,平均分子量越大^[16]。

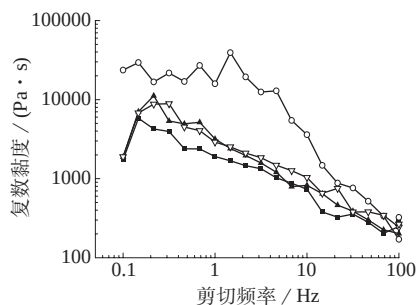


图8 不同 MMT 用量的 PBT/PET/GF50 流变曲线

由图 8 可以看出,低速剪切下未添加 MMT 的 PBT/PET/GF50 黏度最低,加入 MMT 后黏度均有所提升,而 MMT 质量分数为 0.5% 时黏度最高,这表明添加 MMT 有助于 PBT/PET 分子量的保留,且 MMT 质量分数为 0.5% 时保留率最高。由上述分析得知,由于酯交换反应的存在使得 PBT/PET/GF50 形成了分子量较低的链段,二次升温熔融峰熔点低于

PBT, PET 的熔点。结合表 1 可以发现, MMT 质量分数为 0.5% 时材料二次升温的熔点最高, 这与流变结果相吻合, 流变结果佐证了合适用量的 MMT 能有效抑制 PBT/PET/GF50 合金的酯交换反应。

3 结论

(1) 对比发现, 纳米 MMT 作为成核剂对 PBT/PET/GF50 拉伸强度的提升较大。

(2) 随着 MMT 用量增加, PBT/PET/GF50 拉伸强度呈先上升后下降的趋势, 简支梁冲击强度呈下降趋势。当 MMT 质量分数为 0.5% 时, 拉伸强度最大, 比未加 MMT 时提高了 13.1%, 而冲击强度仅下降 2.6%。

(3) MMT 对 PBT 结晶的影响较小, 而对 PET 结晶的影响较大, 因而减缓了两者在结晶速率上的差异。

(4) 由于酯交换反应的存在, 使得 PBT/PET/GF50 二次升温熔融峰向低温偏移, 而 MMT 质量分数为 0.5% 时能有效抑制 PBT 和 PET 的酯交换反应, 使二次升温熔融峰向高温偏移, 同时具有成核作用导致结晶峰向高温偏移, 结晶峰面积变大。

(5) 流变结果佐证了 MMT 质量分数为 0.5% 时有助于加工过程中 PBT/PET 分子量的保留。

参考文献

- [1] Bikiaris D N, Karayannidis G P. Chain extension of polyesters PET and PBT with two new diimidodiepoxides. II[J]. Journal of Polymer Science Part A Polymer Chemistry, 2015, 34(7):1 337-1 342.
- [2] 张忠厚, 冯丽, 何领好, 等. PBT/PET 阻燃材料的非等温结晶动力学[J]. 塑料, 2014, 43(3):103-106.
Zhang Zhonghou, Feng Li, He Linghao, et al. Non-isothermal crystallization kinetics of PBT/PET flame retardant materials[J]. Plastics, 2014, 43(3):103-106.
- [3] Poulouse A M, Piccarolo S, Carbone D, et al. Influence of plasticizers and cryogenic grinding on the high-cooling-rate solidification behavior of PBT/PET blends[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133(10):83-89.
- [4] 崔恩兵. PBT/PC 与 PBT/PET 共混体系性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
Cui Enbing. Study on performance of PBT/PC and PBT/PET blends[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [5] 王建国, 梁秀丽, 孙东, 等. 玻璃纤维增强 PBT/PET 共混物性能研究[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(6):95-98.
Wang Jianguo, Liang Xiuli, Sun Dong, et al. Study on properties of glass fiber reinforced PBT/PET blends[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(6):95-98.
- [6] 曹绍强, 敬新柯, 姚华侠, 等. PBT/PET/GF/滑石粉的非等温结晶行为[J]. 广州化工, 2017, 45(9):37-39.
- [7] Cao Shaoqiang, Jing Xinke, Yao Huaxia, et al. Non-isothermal crystallization behavior of PBT/PET/GF/talc powder[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2017, 45(9):37-39.
- [8] Chisholm B J, Zimmer J G. Isothermal crystallization kinetics of commercially important polyalkylene terephthalates[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 76(8):1 296-1 307.
- [9] 张天水. 聚酯合金基纳米复合材料的制备和性能[D]. 上海: 华东理工大学, 2010.
Zhang Tianshui. Preparation and properties of polyester alloy-based nanocomposites[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2010.
- [10] 姚勇, 何敏, 许琛, 等. 硅烷偶联剂接枝改性 MMT 对 PBT 性能的影响[J]. 塑料工业, 2013, 41(3):98-100.
Yao Yong, He Ming, Xu Chen, et al. Effect of grafting modified montmorillonite with silane coupling agent on PBT properties[J]. China Plastics Industry, 2013, 41(3):98-100.
- [11] 马新敏, 于伟东. PBT/PET 复合纤维组分的红外光谱分析技术[J]. 纺织导报, 2005(7):51-52.
Ma Xinmin, Yu Weidong. Infrared spectroscopy analysis of PBT/PET composite fiber components[J]. Textile Review, 2005(7):51-52.
- [12] 邹文奇, 温变英, 张扬. 酯交换反应对 PBT/PC/Al₂O₃ 复合材料导热性能的影响[J]. 高分子学报, 2016(5):606-613.
Zou Wenqi, Wen Bianying, Zhang Yang. Effect of transesterification on thermal conductivity of PBT/PC/Al₂O₃ composites[J]. Acta Polymerica Sinica, 2016(5):606-613.
- [13] Xu Q Y, Wang L, Liu Y, et al. Study on non-isothermal crystallization kinetics of PBT with high melt flow index[J]. Advanced Materials Research, 2012, 487:58-63.
- [14] 涂定军, 余东栋, 陈贤宏, 等. PBT 抑制 PET 结晶的研究[J]. 塑料工业, 2017, 45(7):89-93.
Tu Dingjun, Yu Dongdong, Chen Xianhong, et al. Study on inhibiting polyethylene terephthalate crystallization by polybutylene terephthalate[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(7):89-93.
- [15] Bikiaris D N, Karayannidis G P. Thermomechanical analysis of chain-extended PET and PBT[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 60(1):55-61.
- [16] Ke Y, Long C, Qi Z. Crystallization, properties, and crystal and nanoscale morphology of PET-clay nanocomposites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 71(7):1 139-1 146.
- [17] 付学俊, 陈锋, 朱文, 等. 阻燃增强 PBT/PET 合金流变行为研究[J]. 塑料科技, 2012, 40(8):40-43.
Fu Xuejun, Chen Feng, Zhu Wen, et al. Study on rheological properties of flame retardant PBT/PET alloy[J]. Plastics Science and Technology, 2012, 40(8):40-43.