

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2013.03.007

PET/PBT 合金的熔融共混及性能

陈 静^{1,2}, 刘爱学²

(1. 湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要: 论述了 PET/PBT 合金的熔融共混理论, 包括两种材料熔融共混过程中的相容性、结晶性及酯交换反应: PET/PBT 共混体系在非晶区是相容的; 加工工艺对共混体系的结晶度影响很大, PET 和 PBT 共混对其结晶过程具有协同效应, 可在成型加工时添加成核体系以促进其结晶; 酯交换反应会使体系的结晶能力下降。简要讨论了合金的机械性能及不同因素对其影响: 合金硬度受体系分子量和淬火时冷却速率的影响, 增强合金的弯曲强度可填充改性无机填充剂, 合金的缺口敏感性强, 缺口冲击强度较低, 所以冲击改性常被作为其重要研究对象。PET/PBT 合金作为一种工程塑料, 现阶段主要应用于汽车领域, 未来将在电子电器、机械工业和汽车零部件等领域有着更广泛的应用。

关键词: PET/PBT 合金; 相容性; 结晶性; 酯交换; 机械性能

中图分类号: TG166

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2013)03-0030-06

The Melt Blending and Properties of PET/PBT Alloy

Chen Jing^{1,2}, Liu Aixue²

(1. School of Packaging and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The melt blending theory of PET/PBT alloy is discussed, which includes compatibility, crystallization and transesterification during the melt blending process of the two materials. The melt blending system of PET/PBT is miscible in the amorphous area, and the producing process has great influence on its crystallinity. Because of the synergistic effect on the crystallization process of PET and PBT blending, adding nucleation system can promote crystallization during moulding and processing phases while the transesterification decreases the probability of crystallization. The mechanical properties of the alloy and their influencing factors are researched. The hardness of the alloy is affected by the molecular weight and the cooling rate when quenching, its flexural strength can be improved through filling inorganic filler. The alloy has strong notch sensitivity and small notched impact strength, therefore impact modification is always considered the most important research subject. As a kind of engineering plastics, the PET/PBT alloy is mainly applied in the automobile area at present, and has good prospects in the applications in electronics, mechanical industry and automobile parts.

Key words: PET/PBT Alloy; compatibility; crystallization; transesterification; mechanical properties

0 引言

近年来, 由于研制合成新的高聚物十分困难, 而

塑料合金化可以使得材料品种更加丰富, 并可改善原有塑料的性能, 因此, 塑料合金化成为高分子材

收稿日期: 2013-01-24

作者简介: 陈 静 (1989-), 女, 湖北鄂州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为聚酯合金材料,

E-mail: cj.judy@foxmail.com

料研究领域的一个重要发展趋势。其中,聚酯合金因为其可调试性较高,已成为塑料合金中的一个重要组成部分。能够合金化的聚酯种类很多,包括聚碳酸酯 (polycarbonate, PC), 聚对苯二甲酸丁二醇酯 (polybutylene terephthalate, PBT), 聚对苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene terephthalate, PET), 聚对苯二甲酸 1,3 丙二醇酯 (polytrimethylene-terephthalate, PTT), 以及聚萘二甲酸乙二醇酯 (polyethylene naphthalate, PEN) 等。

PBT 和 PET 的溶解度参数分别为 $10.8(\text{J}/\text{cm}^3)^{1/2}$ 和 $10.7(\text{J}/\text{cm}^3)^{1/2}$, 十分接近, 根据相似相容原理, 彼此在一定比例上可以混容, 因而容易得到比较理想的合金材料。PET 和 PBT 都是非常重要的商业芳香族-脂肪族聚酯, 均具有耐高温、耐湿、耐化学腐蚀、电绝缘性能好和良好的弹性等特点^[1]。但是二者在成型性能方面有着很大的差别: PET 的熔体黏度较低, 结晶速率较慢, 成型较困难; PBT 则有着很快的结晶速率和较好的成型性。二者的共混物不仅综合了各自的优良性能, 还能在一定程度上降低生产成本, 已被大量用于纺丝 (纯的合金) 和工程塑料行业 (增强级) 等领域中^[1]。

由于 PET/PBT 合金的晶/晶共混体系的特殊性, 所以对其共混理论的研究显得尤为重要, 其中包括熔融共混合金的相容性和结晶性; 另外, PET/PBT 在共混时极易发生酯交换反应^[2], 这些方面都会对共混合金的最终性能 (主要表现在机械性能方面) 产生一定的影响。本文拟就 PET/PBT 合金在以上方面的已有研究进行综述, 以期对 PET/PBT 合金的后续研究提供一定的理论依据。

1 熔融共混理论研究

1.1 相容性

一般通过差示扫描量热分析 (differential scanning calorimetry, DSC) 和扫描电镜分析 (scanning electron microscope, SEM) 来研究 PET/PBT 合金的相容性。图1是 PET/PBT 合金典型的一次加热-冷却 DSC 图, 其中升温 and 冷却速率均为 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

从图1中可以看出: PET/PBT 共混体系只有一个玻璃化转变温度 T_g (约为 $55\text{ }^\circ\text{C}$), 但却显示出 2 个熔融峰 (其中, PBT 的熔点为 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 左右, PET 的熔点为 $223\text{ }^\circ\text{C}$ 左右), 所以 PET/PBT 共混体系在非晶区是相容的; 然而在晶区它们是相分离的, 不生成共晶结构^[3]。

另外, 相关科研工作人员经研究发现, 当 PET 和

PBT 为无定形态 (非晶态) 时, 其物理共混物在任何组成下都是相容的^[4]。共混体系组成上的差别只会对合金的更微观一些的形态特征造成影响, 比如 G. Aravinthan 等人通过 SEM 对不同组成下的合金的形态特征做了研究, 其结果表明, 只有当 PET 和 PBT 的质量比 (即 $w(\text{PET}):w(\text{PBT})$) 为 40:60, 50:50 和 60:40 时, 所组成的合金才显示出纤维特征^[5], 这种纤维特征也是其用于纺丝所需的重要性能。

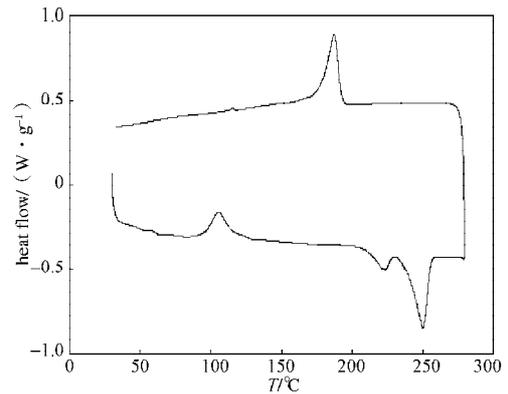


图1 PET/PBT 合金的一次加热-冷却 DSC 图像
Fig. 1 DSC thermograms of PET/PBT blends: heating and cooling once at $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$

1.2 结晶性能

PET/PBT 合金为晶/晶共混物, 其结晶性能十分复杂, 且受到很多因素的影响。通常所说的结晶性能可通过结晶度、结晶温度和结晶速率等参数来表征。这 3 个方面受到合金组成、预处理过程、制备过程和条件、后处理过程和所添加的成核体系等的影响, 且这些因素还会相互作用。

1.2.1 结晶度

PET/PBT 合金必须具备一定的结晶度, 才能确保其耐高温性和耐候性。PET/PBT 合金对加工工艺十分敏感, 这在很大程度上是因为加工工艺对共混体系的结晶度的影响很大造成的。经挤出后的共混体系需经淬火冷却才可以结晶, 而冷却速率也会对结晶度造成一定的影响。V. La Carrubba 等人通过广角 X 射线衍射 (wide-angle X-ray diffraction, WAXD) 图像的去卷积对此进行了研究, 发现合金的结晶度与其密度的变化是一致的。且他通过对变化着的冷却速率下的合金密度进行了研究, 发现质量比为 40:60 的 PET/PBT 合金在低冷却速率范围内表现出的密度为 $1.350\text{ g}/\text{cm}^3$, 在高冷却速率范围内表现出的密度为 $1.290\text{ g}/\text{cm}^3$ ^[6]。这说明冷却速率越高, PET/PBT 合金的密度越低, 结晶度越低。

1.2.2 结晶温度和速率

PET/PBT 共混体系的结晶温度和结晶速率都是

其结晶难易程度的一个显示。相关研究表明, PET与PBT的共混对其结晶过程具有协同效应, 也即二者的共混对各自的结晶过程相互促进。Nadka Avramova等人的研究发现, PET含量越高, 结晶温度 T_c 越高^[4], 如图2中合金组成- T_c 关系曲线所示, 当 $w(\text{PET})=0$ 时, $T_c=61.5\text{ }^\circ\text{C}$; 当 $w(\text{PET})=60\%$ 时, $T_c=72\text{ }^\circ\text{C}$; 当 $w(\text{PET})=100\%$ 时, $T_c=135\text{ }^\circ\text{C}$ 。

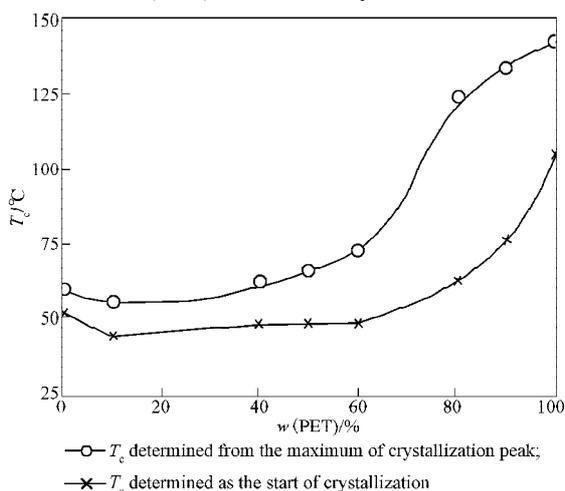


图2 依赖于PET/PBT合金组成的结晶温度曲线

Fig. 2 Crystallization temperature depending on the composition of PET/PBT blends

由于PET的结晶速率太慢会影响整体共混体系的结晶性能, 所以一般在成型加工时添加成核体系以促进其结晶。经研究发现, 添加成核母粒Nu-2不仅可以促进PET/PBT的结晶速度, 同时还能抑制其酯交换反应^[7]。

1.3 酯交换反应

通过DSC两次循环扫描加热法来研究聚酯之间的酯交换反应, 已是一种较为成熟的方法。聚酯在成型加工和二次受热过程中很容易发生酯交换反应, 而一旦发生酯交换反应, 则会使体系的结晶能力下降。因此, 可通过DSC图像讨论一次受热和二次受热过程中熔点温度和结晶温度的变化, 从而对酯交换反应进行定性分析和研究^[8]; 而在已有的表征手段中, 定量分析能用到的仅有核磁共振扫描(nuclear magnetic resonance, NMR), 其中包括 $^1\text{H-NMR}$ 和 $^{13}\text{C-NMR}$, 即氢谱和碳谱。在核磁图谱上, 体系的所有出峰位置的化学位均向高处偏移, 这说明由于熔融共混使得PBT和PET的苯环两边所带的碳原子(即季芳香碳原子)的数目发生了变化^[9]。可通过NMR来探测季芳香碳原子在PET/PBT共聚酯链不同的序列结构中的化学位移, 将酯交换反应程度表示为 Y , 根据以下式子进行估算:

$$Y = I_Z / I_J,$$

其中, $Z=Z_1, Z_2$; $J=Z_1, Z_2, X_1, X_2$ 。

式中: I_Z 为 Z_1 和 Z_2 部分区域, I_J 表示季芳香碳原子的整个区域^[10]。

对于相容的聚酯共混体系, 由于组分分子链具有良好的相互扩散能力, 因此酯交换反应容易进行^[11]。事实上, 酯交换反应已逐渐成为一种共混增熔手段, 但对于PET/PBT共混体系, 酯交换反应则会导致合金的热变形温度、结晶温度和熔点降低, 力学性能劣化^[2]。其原因是发生酯交换反应后, 形成了无规则的共聚物。因此, 为保证PET/PBT合金的优异性能, 控制其酯交换反应至关重要。首先, 需要探讨二者的酯交换反应动力学问题, 已有研究发现, PET和PBT的反应性共混过程符合二级反应动力学, 主要为直接酯交换过程, 而酯交换反应活化能和速率常数受到扩链剂和投料比等因素的影响^[12]。前面已经陈述过, PET/PBT共混体系对加工工艺十分敏感, 另一个方面的原因是加工工艺对体系的酯交换反应程度影响很大。一般要避免过高的共混温度、过长的停留时间, 以减少体系的含水量^[13]。

共混体系的酯交换反应与混合时间几乎呈线性增长关系, 且在同样的混合时间下, 温度越高, 酯交换程度越大^[10], 如图3所示为酯交换反应程度与合金在不同温度下混合的时间关系, 其中的EB12, EB22, EB32分别表示在260, 270, 280 $^\circ\text{C}$ 3种不同温度下共混的合金。

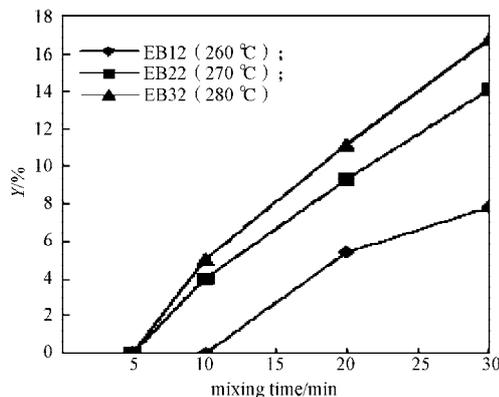


图3 酯交换反应程度与合金在不同温度下混合的时间关系图

Fig. 3 Degree of transesterification vs. mixing time for blends mixed at different temperatures

除了加工工艺外, 体系组成及添加剂也会对酯交换反应造成影响。首先, 要注意母料配比, 因为酯交换反应速率与组分的含量成正比, 在质量之比为50:50的配比合金中, 酯交换反应的作用将达到最大^[4]。另外, 一般会向共混体系中加入酯交换抑制剂, 现有的应用较为广泛的酯交换抑制剂为亚磷酸三苯酯(triphenyl phosphite, TPPi)。TPPi在抑制酯交

换反应的同时,会使得分子间发生扩链反应,且会使体系的拉伸性能有所改善,弯曲性能变化不大,而无缺口冲击强度得到大幅度提高^[14],Wang Feng等人研究了纯二氧化硅和经硅烷偶联剂改性的二氧化硅对PET/PBT体系酯交换反应的影响,发现二者均可以有效抑制体系的酯交换反应,且前者的抑制效果更好^[15]。另外,有机硅磷酸酯、一些无机填充物等,也都对PET/PBT体系的酯交换反应有着抑制作用。

2 机械性能

PET/PBT合金的刚性高,硬度大,耐磨损、磨耗性强,经抗冲击改性过后的合金,在工程塑料领域的应用越来越广泛。

2.1 硬度

硬度大是PET/PBT合金最显著的一个性能,也是对其广泛开发应用的一个重要性能。

体系的分子量对合金的硬度有着直接影响,只有保证体系一定的分子量才能保证其获得较高的硬度。而影响PET/PBT合金分子量的因素很多,包括成型时的混炼时间、体系的含水量以及共混物中的添加剂等。事实上,PET/PBT合金的分子量与体系的酯交换反应程度以及是否发生降解是密不可分的。混炼时间过长、体系未充分干燥等都会影响酯交换反应程度,并引起合金降解,合金的分子量自然也会降低,所以成型时需向体系中添加酯交换反应抑制剂和稳定剂。据已有研究发现,添加了TPPi后的合金的重均分子量有一个先增大,达到最大值后又降低的变化趋势:即混合时间达到15 min左右时,合金的重均分子量达到最大值,约为86 500;且随着TPPi添加量的增大,合金的重均分子量所能达到的最大值有所降低^[16]。

另外,合金的硬度与结晶度一样,受到淬火时冷却速率的影响:当冷却速率为0.1 K/s时, M_H (微硬度)=180;当冷却速率为10 K/s时, M_H =160;当冷却速率为100 K/s时, M_H =90。即整体趋势为:随着冷却速率的增大,合金的微硬度逐渐降低^[17]。此外,第三组分的并入也会使得合金的硬度发生改变,比如向共混体系中添加等量(质量分数约为体系的10%)的TiO₂、聚己二酰己二胺(polyamide 66, PA66)和低密度聚乙烯(low density polyethylene, LMPE)的合金,相应的硬度分别为122,110和103,而相同组成的纯PET/PBT合金的硬度约为116^[18],这是因为TiO₂本身的硬度比母料的大,而PA66和LMPE的密度和硬度都比母料的要小,从而使得合金的硬度产生相

应变化。

2.2 强度

PET有着明显的剪切变稀现象,显示出较低的熔体弹性^[19],PBT的熔体黏度也不高,这也造成了二者的合金具有较低的熔体黏度和强度。在挤出成型过程中,不足以拉成条剪切造粒(尤其是纯料的挤出);在注塑过程中,较易出现喷嘴流涎现象,为成型带来一定困难。因此,为提高PET/PBT合金的熔体强度,在挤出和注塑成型过程中,控制好工艺参数,比如加工温度、螺杆转速、模具温度等都十分重要,一般加工温度应控制在220~260℃,模具温度应控制在60~80℃。

另外,PET/PBT合金的机械强度也是表征其机械性能好坏的重要参数。纯PET/PBT合金的力学性能如表1^[12]所示。

表1 PET/PBT共混物的力学性能

w(PET)/ w(PBT)	力学性能			
	拉伸强度/ MPa	弯曲强度/ MPa	断裂 伸长率/%	缺口冲击强度/ (kJ·cm ⁻²)
10/90	4 230	6 400	4.6	1.95
20/80	3 150	4 860	3.3	1.29
30/70	3 960	5 560	4.2	1.95
40/60	4 040	6 950	4.3	2.76
50/50	4 400	7 450	5.5	3.10
80/20	4 000	7 150	5.2	3.24

由表1可以看出,PET和PBT的质量比为50/50合金的综合力学性能最好。但由于纯的PET/PBT合金材料本身质脆,所以需向母料中添加助剂来提高材料的机械强度。对合金的拉伸强度、弯曲强度以及冲击强度的具体分析如下:

1) 拉伸强度。PET/PBT合金本身的拉伸强度较高,一般不作为增强研究对象,但用于提高其它性能的助剂的添加也会对其造成影响,因此,需对比目标性能,综合评价助剂的功效。

2) 弯曲强度。增强合金弯曲强度的一个重要方法是填充改性无机填充剂。据研究发现,填充一定量的Ti-BaSO₄可以使合金的弯曲强度增大,但需控制好添加量,因为当其添加质量分数为10%时,合金的弯曲强度约为62.5 MPa;Ti-BaSO₄添加质量分数为15%时,合金的弯曲强度达到最大值,为80 MPa;此后继续添加,则合金的弯曲强度会急剧下降^[20]。

3) 冲击强度。PET/PBT共混物作为工程塑料使用时,其最大的缺点是缺口敏感性强,缺口冲击强度较低^[21]。所以冲击改性常被作为PET/PBT合金的重要研究和分析对象。已有相关研究发现,合金的组成和第三组分的加入对合金的冲击性能都有很大

影响。研究结果显示, PBT/PET 的质量之比为 5/1 的母料显示出比质量之比为 2/1 的母料具有更好的冲击性能, 而马来化乙烯-辛烯共聚物 (maleinized poly(ethylene-octene) copolymer, mPEO) 常被用作 PET/PBT 合金的冲击改性剂, 当 mPEO 的添加质量分数超过 20% 时, 共混物的冲击性能将会发生超强转变, 冲击强度从 mPEO 添加质量分数为 20% 下的 95 J/m 迅速提高到添加质量分数为 30% 下的 640 J/m^[22]。

3 结语

PET/PBT 合金虽然有着各种优异的性能, 但仍存在结晶速率慢、缺口低、收缩率大、成本较高、加工困难等缺点。

首先, 在成型加工方法方面, 球磨碾磨技术逐渐在聚合物的加工中兴起, 且此技术适宜于制备聚合物合金。它克服了一些与传统方式有关的问题, 比如由于熔融过程中的过度加热而产生的热降解, 或者将聚合物从溶剂中移走的困难性 (如果用到了溶解方式的话)^[23]。因此, PET/PBT 合金成型加工工艺中的技术改进将是今后该领域主要的研究方向之一。

另外, 在改性及应用方面, PET/PBT 合金目前在工程领域的应用较多为汽车领域。通过控制无机填料的量以保证合金的表面光泽度^[24], 填充石墨、炭黑、碳纳米管等改善合金的导电性能^[25], 添加阻燃剂、控制 PET 含量来赋予合金阻燃性能^[26]等改性手段都已经被用来生产汽车装饰件和应用于工程领域的导电复合材料和阻燃材料生产中。未来在较大提高其冲击强度和耐磨损性后, PET/PBT 聚酯合金将在电子电器、机械工业和汽车部件等领域有着更为广泛的应用。

参考文献:

- [1] 袁文, 李健, 隋轶巍, 等. PBT/PET 合金研究进展[J]. 塑料工业, 2008, 36 (增刊 1): 4-5, 10.
Yuan Wen, Li Jian, Sui Yiwei, et al. Progress in Research on PBT/PET Alloy[J]. China Plastics Industry, 2008, 36 (S1): 4-5, 10.
- [2] 雷彩红, 苟玉慧, 陈大华. 有机硅磷酸酯对 PBT/PET 酯交换反应的影响[J]. 中国塑料, 2009, 23(1): 24-27.
Lei Caihong, Gou Yuhui, Chen Dahua. Effect of Silicone Phosphate on Transesterification Reaction in PBT/PET Blend[J]. China Plastics, 2009, 23(1): 24-27.
- [3] 钟伟宏, 孙航. PET/PBT 共混体系的相容性及结晶行为研究[J]. 合成技术及应用, 1998, 13(2): 7-13.
Zhong Weihong, Sun Hang. Studies on Compatibility and Crystallization Behavior of PET/PBT Blend Polymer[J]. Synthetic Technology and Application, 1998, 13(2): 7-13.
- [4] Avramova N. Amorphous Poly(Ethylene Terephthalate)/Poly(Butylene Terephthalate) Blends: Miscibility and Properties[J]. Polymer, 1995, 36(4): 801-808.
- [5] Aravinthan G, Kale D D. Blends of Poly(Ethylene Terephthalate) and Poly(Butylene Terephthalate)[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 98: 75-82.
- [6] Carrubba V La, Piccarolo S, Brucato V. Analysis of the Crystallization Behaviour of PBT Rich PBT/PET Blends Under Processing Conditions[C]//CP907, 10th ESAFORM Conference on Material Forming. [S.l.]: American Institute of Physics, 2007: 789-794.
- [7] 金建, 杨喆. 成核母粒在 PBT/PET 合金中的应用[J]. 中国塑料, 2008, 22(10): 72-75.
Jin Jian, Yang Zhe. Applications of Nucleating Masterbatch in PBT/PET Alloy[J]. China Plastics, 2008, 22(10): 72-75.
- [8] 雷彩红, 苟玉慧. DSC 在研究聚合物共混体系酯交换反应中的应用[J]. 广东工业大学学报, 2009, 26(1): 62-64, 74.
Lei Caihong, Gou Yuhui. Application of DSC in the Studies of Transesterification Reaction in Polymer Blends[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2009, 26(1): 62-64, 74.
- [9] 张彦, 张瑜. PBT/PET 共混体系酯交换行为的¹³C-NMR 研究[R/OL]. [2007-10-20]. http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_6331794.aspx.
Zhang Yan, Zhang Yu. The ¹³C-NMR Research of Ester Inter-Change of PBT/PET Blending System[R/OL]. [2007-10-20]. http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_6331794.aspx.
- [10] Liu Senlin, Li Wengang, Liang Borun, et al. Chain Structure and Thermal Behavior of Reactive Blends of Poly(Ethylene-Terephthalate)/Poly(Butylene Terephthalate) by Addition of 2,2-(1,4-Phenyl) Bisoxazoline[J]. European Polymer, 2000(36): 2159-2165.
- [11] 孙玉蓉. 碳纳米管对聚酯共混体系酯交换反应的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2010.
Sun Yurong. The Ester Exchange Reaction of Polyester Blending System of Carbon Nanotubes[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2010.
- [12] 刘森林, 梁伯润. PET/PBT 反应性共混酯交换动力学及其 Monte Carlo 模拟[J]. 合成技术及应用, 2000, 15(2): 4-8.
Liu Senlin, Liang Borun. The Transesterification Kinetics and Its Monte Carlo Simulation of PET/PBT[J]. Synthetic Technology and Application, 2000, 15(2): 4-8.
- [13] 邓如生. 共混改性工程塑料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 306.

- Deng Rusheng. Blending Modified Engineering Plastics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 306.
- [14] 刘春林, 吴 意, 李 军, 等. 亚磷酸三苯酯扩链制备 PBT/PET 合金[J]. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(2): 163-165, 170.
- Liu Chunlin, Wu Yi, Li Jun, et al. Producing PBT/PET Alloy by Triphenyl Phosphite Chain-Extending Reaction [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2011, 27 (2): 163-165, 170.
- [15] Wang Feng, Meng Xiangfu, Xu Xinfeng, et al. Inhibited Transesterification of PET/PBT Blends Filled with Silica Nanoparticles During Melt Processing[J]. Polymer Degradation and Stability, 2008, 93: 1397-1404.
- [16] Jacques B, Devaux J, Lagras R. Reactions Induced by Triphenyl Phosphite Addition During Melt Mixing of PET/PBT Blends: Chromatographic Evidence of a Molecular Weight Increase Due to the Creation of Bonds of Two Different Natures[J]. Polymer, 1997, 38(21): 5367-5377.
- [17] Antonio Stocco, Vincenzo La Carrubba, Stefano Piccaloro, et al. The Solidification Behavior of a PBT/PET Blend over a Wide Range of Cooling Rate[J]. Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, 2009, 47: 799-810.
- [18] Eun-Soo Park. Morphology, Mechanical, and Dielectric Breakdown Properties of PBT/PET/TPE, PBT/PET/PA66, PBT/PET/LMPE, and PBT/PET/TiO₂ Blends[J]. Polymer Composites, 2008, DOI 10.1002/pc.20626: 1111-1118.
- [19] J 谢尔斯, T E 朗. 现代聚酯[M]. 赵国梁, 译. 北京: 化学工业出版社, 2007: 391.
- John Sher, Timothy E Long. Modern Polyesters[M]. Zhao Guoliang, Translated. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 391.
- [20] Sang-Soo Lee, Junkyung Kim, Min Park, et al. Transesterification Reaction of the BaSO₄-Filled PBT/Poly (Ethylene Terephthalate) Blend[J]. Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, 2001, 39: 2589-2597.
- [21] 曹宇飞, 孙树林, 沙 莎, 等. 高韧性PET/PBT合金的制备及性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2009, 25(11): 137-140.
- Cao Yufei, Sun Shulin, Sha Sha, et al. Preparation and Properties of Poly(Ethylene Terephthalate)/Poly(Butylene Terephthalate) Alloys with High Toughness[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2009, 25(11): 137-140.
- [22] Guerrica-Echevarri' G A, Eguiaza' J I Bal. Structure and Mechanical Properties of Impact Modified Poly(Butylene Terephthalate)/Poly(Ethylene Terephthalate) Blends[J]. Polymer Engineering and Science, 2009, DOI 10.1002/pen : 1013-1021.
- [23] Joan Font, Joaquim Muntassell, Eduard Cesari. Poly (Butylene Terephthalate)/Poly(Ethylene Terephthalate) Mixtures Formed by Ball Milling[J]. Materials Research Bulletin, 1999, 34(1): 157-165.
- [24] Myung Wook Kim, Seung Hwan Lee, Jae Ryouon Youn. Effects of Filler Size and Content on Shrinkage and Gloss of Injection Molded PBT/PET/Talc Composites[J]. Polymer Composites, 2010: DOI 10.1002/pc.
- [25] 韩永芹. PET/PBT 共混导电复合材料的研究[J]. 上海塑料, 2006(4): 23-25.
- Han Yongqin. Research on the Conducting Composites of PET/PBT Blends[J]. Shanghai Plastics, 2006(4): 23-25.
- [26] 付学俊, 卢立波, 朱 文, 等. 阻燃增强 PBT/PET 合金的性能研究[J]. 塑料工业, 2012, 40(9): 41-43, 87.
- Fu Xuejun, Lu Libo, Zhu Wen, et al. Properties Study of Reinforced and Flame Retardant PBT/PET Alloy[J]. China Plastics Industry, 2012, 40(9): 41-43, 87.

(责任编辑: 廖友媛)