

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.10.008

ABS/PTT/PTTG三元复合材料的制备及性能

陈家鑫, 张文帅, 邵芹, 王昕瑜, 陈延明

(沈阳工业大学石油化工学院, 辽宁辽阳 111003)

摘要:以聚对苯二甲酸(PTA)、1,3-丙二醇(1,3-PDO)与1,4-环己烷二甲醇(CHDM)制备具有低结晶性能的聚对苯二甲酸1,3-丙二醇-co-1,4-环己烷二甲酯(PTTG)作为第三组分,采用熔融挤出法制备易于染色的低结晶度丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)/聚对苯二甲酸1,3-丙二酯(PTT)/PTTG三元共混复合材料。通过差示扫描量热仪、热重分析、扫描电子显微镜和电子万能试验机考察了PTTG的质量分数对ABS/PTT/PTTG复合材料的热稳定性、断面形貌、相容性及力学性能的影响。研究表明,随着PTTG共聚酯含量增加,ABS/PTT/PTTG复合材料的熔融温度和结晶性能逐渐降低,结晶度由48.08%降低到24.42%,PTTG对ABS/PTT复合材料具有明显的增容作用,同时材料的热稳定性也逐渐提高。当PTTG的质量分数达到25%时,有较为明显的屈服现象,复合材料断面发生韧性断裂,呈现韧性断裂特征;拉伸强度和弯曲强度随着PTTG含量的增加逐渐降低,当PTTG的质量分数达到25%时,复合材料的缺口冲击强度达到4.4 kJ/m²,较ABS/PTT复合材料提高了29.41%。

关键词:聚对苯二甲酸1,3-丙二醇-co-1,4-环己烷二甲酯;聚对苯二甲酸1,3-丙二酯;结晶;增容

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)10-0041-06

Preparation and Properties of ABS /PTT /PTTG Ternary Composites

Chen Jiaxin, Zhang Wenshuai, Shao Qin, Wang Xinyu, Chen Yanming

(School of Petrochemical Engineering, Shenyang University of Technology, Liaoyang 111003, China)

Abstract : Poly (1,3-propanediol-co-1,4-cyclohexanedimethanol)(PTTG) with low crystallinity was prepared from poly (terephthalic acid) (PTA), 1,3-propanediol (1,3-pdo) and 1,4-cyclohexanedimethanol (CHDM). PTTG as the third component, acrylonitrile-butadiene-styrene plastic (ABS) / poly (1,3-propylene terephthalate) (PTT) /PTTG ternary blend composite with low crystallinity was prepared by melt extrusion method. The effects of PTTG content on the thermal stability, cross-sectional morphology, compatibility and mechanical properties of ABS /PTT /PTTG composites were investigated by differential scanning calorimeter, thermogravimetric, scanning electron microscope and electronic universal testing machine. The results show that with the increase of PTTG copolyester content, the melting temperature and crystallinity of ABS /PTT /PTTG composites gradually decrease, and the crystallinity decreases from 48.08% to 24.42%. PTTG has obvious compatibilization effect on ABS /PTT composites, and the thermal stability of the composites is also gradually improved. When the mass fraction of PTTG reaches 25%, there is obvious yield phenomenon, and the fracture surface of the composite is ductile fracture, showing the characteristics of ductile fracture. The tensile strength and bending strength gradually decrease with the increase of PTTG content. When the mass content of PTTG reach 25%, the notched impact strength of the composite reach 4.4 kJ / m², which is 29.41% higher than that of ABS /PTT composite.

Keywords : poly(1,3-propanediol-co-1,4-cyclohexanedimethanol terephthalate) ; poly(1,3-propylene terephthalate) ; crystal ; capacity increase

近些年来,随着经济技术的飞速发展,人们对物质的要求不再满足于经济适用,在适用的同时拥有绚丽多彩的色泽往往会更加受到人们的喜爱。

丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)具有良好的流动性、耐腐蚀性和低气味,与具有高拉伸回弹率和抗污性能聚对苯二甲酸1,3-丙二酯(PTT)的合金材料具

通信作者: 陈延明,教授,主要研究方向为通用高分子材料高性能化及其产品应用技术开发

收稿日期: 2022-07-25

引用格式: 陈家鑫,张文帅,邵芹,等. ABS/PTT/PTTG三元复合材料的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(10):41-46.

Chen Jiaxin, Zhang Wenshuai, Shao Qin, et al. Preparation and properties of ABS /PTT /PTTG ternary composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(10):41-46.

有较好的耐化学性、耐冲击性能和良好的加工性能^[1-4],广泛运用于服装、汽车、室内装饰及家居织物等领域。但二者的相容性差、合金结晶度高、热稳定性差等缺点,不利于日常生产过程中对原料的染色加工及使用,应用范围受到限制^[5]。而结晶度的高低是决定材料是否易于染色的重要的影响因素之一,结晶度越高,染料分子难以进入硬链段,染色越困难^[6-8]。

大多数聚合物是不相容的,会产生弱界面和较低的力学和阻隔性能,现有增容方法有接枝共聚物、添加低分子量反应聚合物、加入嵌段和加入纳米粒子等^[9]。有研究表明 ABS/PTT 为部分相融^[10],为改善二者的相容性,李涛等^[11]以苯乙烯-丁二烯-马来酸酐为增容剂,可使 ABS/PTT 复合材料两相相畴显著细化,两相界面状态明显改善;而采用马来酸酐直接接枝 ABS,可使 ABS-g-MAH 中的酸酐基团在熔融条件下和 PTT 中的端羟基发生酯化反应,使二者相容性得到进一步改善^[12-13]。另一方面,以马来酸酐接枝 PTT,同样能够通过减小相尺寸和改善两相之间的相容性来改善相分散提升共混物韧性和导电性,使二者的性能更好结合^[14]。

以上研究表明,以马来酸酐接枝后的增容剂加入对改善 ABS/PTT 的相容性效果具有显著作用。但以纯第三单体聚酯来改善 ABS/PTT 复合材料相容性的研究目前还较少见。因此笔者将先以聚对苯二甲酸(PTA)、1,3-丙二醇(1,3-PDO)与 1,4-环己烷二甲醇(CHDM)制备聚对苯二甲酸 1,3-丙二醇-co-1,4-环己烷二甲酯(PTTG)作为第三组分,再将 ABS 和 PTT 与 PTTG 以熔融共混的方式制备 ABS/PTT/PTTG 复合材料,并对复合材料的热稳定性、相容性、结晶性能、力学性能等进行研究,以期在起到增容作用的同时,得到一种结晶度较低,以便于染色加工的复合材料。

1 实验部分

1.1 主要原材料

ABS:GN-II,中国石油天然气股份有限公司吉林石化分公司;

PTT:4701FR NH,杜邦高性能聚合物公司;

PTA:工业级,营口康辉石化有限公司;

1,3-PDO:工业级,广东高良科技有限公司;

CHDM:工业级,广州昊毅化工有限公司。

1.2 主要设备及仪器

聚合反应釜:GSH5 型,威海环宇化工机械有限公司;

双螺杆挤出机:TSE-40 型,南京科亚橡塑机械有限公司;

注塑成型机:HZ50 型,宁波市鄞州海震机械制造有限公司;

核磁共振氢谱(¹H NMR)仪:Mercury-Vx-300M 型,美国 Varian 公司;

热重(TG)分析仪: TG-DTA 8122 型,日本 Rigaku 公司;

差示扫描量热(DSC)仪: DSC-822e 型,瑞士 Mettler Toledo 公司;

扫描电子显微镜(SEM):Regulus 8230 型,日本日立公司;

电子万能试验机:CMT6104 型,深圳三思材料检测有限公司;

悬臂梁冲击试验机:DJF-20 型,长春智能仪器设备有限公司。

1.3 样品制备

(1) PTTG 的制备。

将 PTA, 1,3-PDO, CHDM 以 1:1.7:0.425 物质的量比与钛系催化剂投入 5 L 聚合釜中,初始温度为 250℃预热,转速 40 r/min,预热结束后增大为 90 r/min,进行酯化反应。酯化反应完成后,将釜内环境改变为低真空状态,在 240℃,0.09 MPa 的条件下完成预缩聚反应。最后在高真空的环境下完成最终的缩聚反应得到最终产物 PTTG。

(2) ABS/PTT/PTTG 复合材料的制备。

将 PTT, ABS 和 PTTG 在 95℃的条件下鼓风干燥 16 h,干燥完成后,将 ABS/PTT/PTTG 按照表 1 方案进行实验配料并充分混合;将混合后的物料通过双螺杆挤出机挤出,螺杆各段温度依次设置为 240, 250, 255, 258, 260℃,螺杆转速为 200 r/min。经过挤出、冷却、造粒、干燥后,再将物料注塑为标准样条并进行相关性能测试。

表 1 ABS/PTT/PTTG 复合材料物料配比 份

试样编号	ABS	PTT	PTTG
1 [#]	50	50	0
2 [#]	50	45	5
3 [#]	50	35	15
4 [#]	50	25	25

1.4 性能测试与结构表征

¹H NMR 测试:取 9 mg 干燥后 PTTG 样品置于

NMR管中,加入氘代三氟乙酸/氘代氯仿体积比为1:4混合溶剂后进行超声,以TMS为内标进行测试。

TG测试:称取实验样品3~5 mg,在氮气的氛围下,以20°C/min的速率将样品从室温升温至700°C,观察样品热失重情况。

DSC测试:称取9mg左右共混样品,在氮气保护下以10°C/min升温至265°C,然后持续3 min以消除历史热,然后再以10°C/min降温速率将样品温度降至25°C。

非等温测试:以10°C/min升温速率进行加热至设定温度265°C并维持3 min,根据设定方案以5, 10, 15, 20°C/min的降温速率降至25°C,得到共混物非等温DSC曲线图。

SEM分析:采用液氮脆断,断面做喷金处理,测试条件加速电压为15 kV,工作距离7.5~10 mm。

力学性能测试:拉伸强度按照GB/T1014-2006测试;弯曲强度按照GB/T9341-2008测试;冲击强度按照GB/T1843-2008测试。

2 结果与讨论

2.1 ^1H NMR 分析

图1~图2分别是PTTG样品的 ^1H NMR图及PTTG的结构简式。由图1可知,在PTTG的核磁图谱中存在a/b/c/d/e五种氢的特征峰,通过MestReNova软件分析得出这五种峰分别对应图2中的五种环境的H特征峰,即化学位移在 $(1.21 \sim 1.99) \times 10^{-6}$ 处的峰对应结构单元中的 H_a ;化学位移在 2.40×10^{-6} 处的峰对应结构单元中的 H_b ;化学位移在 4.62×10^{-6} 处的峰对应结构单元中的 H_c ;化学位移在

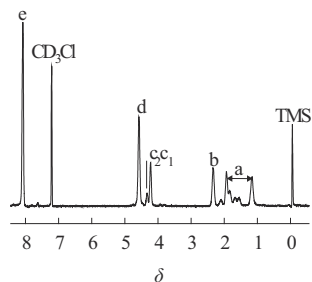


图1 PTTG共聚酯样品的 ^1H NMR谱

4.39×10^{-6} 处的峰对应结构单元中的 H_{c1} ;化学位移在 4.28×10^{-6} 处的峰对应结构单元中的 H_{c2} ;化学位移在

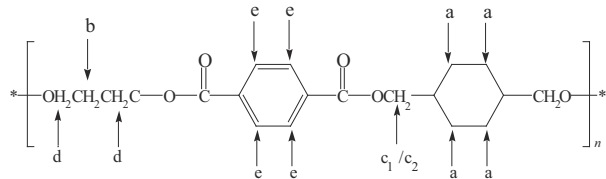


图2 合成PTTG共聚酯链段结构简式

8.13×10^{-6} 处的峰对应结构单元中的 H_e ;由以上分析可知合成的聚合物为PTTG。

2.2 TG 分析

图3为纯PTT与不同含量PTTG复合材料的热稳定数据。由图3可知,随着PTTG的加入量增加,TG曲线的最大质量损失处温度逐渐向高温区移动,即随着PTTG的质量分数不断增加,复合材料的热分解温度不断提高,这可能是由于PTTG的加入使得ABS与PTT之间的相容性增加,使二者的相互结合更加充分,减少材料热聚集,有利于整个复合材料的均匀散热,同时PTTG本身具有出色的热稳定性,从而使得复合材料的热稳定性进一步提高。

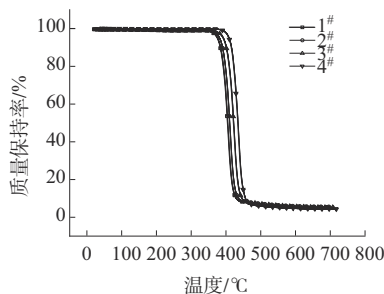
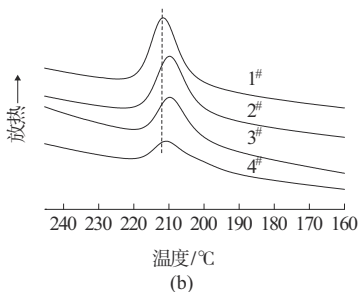
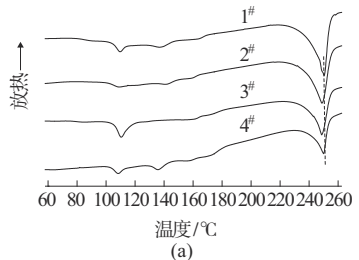


图3 PTTG用量不同时ABS/PTT/PTTG复合材料TG曲线

2.3 DSC 分析

图4为不同配比的ABS/PTT/PTTG复合材料的热DSC升、降温曲线,相关热性能数据见表2。由图4a可以看出,在PTTG未加入前,ABS/PTT复合材料出现两个玻璃化转变温度(T_g),表明二者的相容性较差。在ABS含量不变的情况下,随着PTTG的逐渐加入ABS/PTT/PTTG复合材料的相容性逐渐得到改善,当PTTG的质量分数为15%时,只存在一个明显的 T_g 。这表明随着PTTG的加入,二者的相容性逐渐得到改善,PTTG发挥了较好的增容效果。当PTTG的质量分数为25%时,又出现了两个 T_g ,这可能是PTTG的量超过PTT时,分散场发生转变相,使得复合材料的相容性降低。从图4a和图4b可以看出,随着PTTG的加入,ABS/PTT/PTTG复合材料的熔点(T_m),结晶度(X_c)均存在逐渐降低的趋势。复合材料的 T_m 逐渐降低,熔融峰的面积逐渐减小,这可能是由于PTTG中刚性分子链的加入破坏了复合材料的整体有序结构程度,使得在偏低的温度条件下晶体结构遭到破坏,使得复合材料的 T_m 降低,同时在峰宽不变的情况下,峰逐渐平缓变低,表明复合材料的结晶能力逐渐降低;在降温曲线中熔融结晶峰温度是表征高聚物在高温下结晶成核的难易^[15],

熔融结晶温度(T_c)降低且峰的高度逐渐降低,表明PTTG的加入抑制了复合材料的结晶^[16],可能的原因是经过熔融后,PTTG分子会与ABS/PTT的分子存在相互纠缠和酯交换反应,阻碍了分子进行规整排列,从而阻碍了结晶过程,使得复合材料的 X_c 减小的同时又保障了复合材料的热稳定性^[17-18]。



a—升温;b—降温

图4 ABS/PTT/PTTG复合材料的DSC曲线

表2 ABS/PTT/PTTG复合材料的热性能

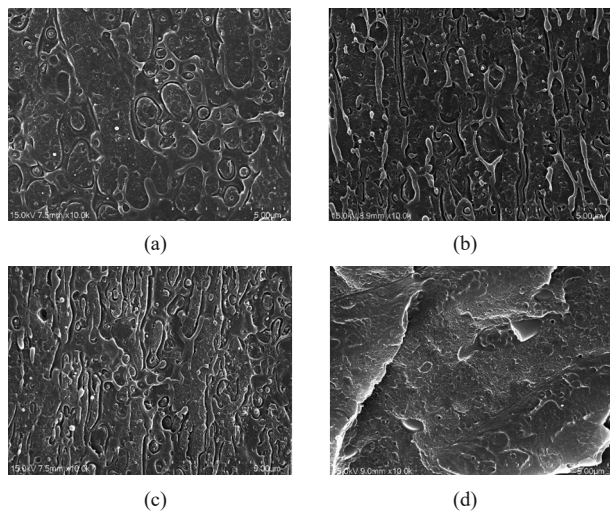
试样编号	$T_m/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H_c/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$X_c/\%$
1 [#]	252.00	211.69	18.17	48.08
2 [#]	251.07	208.04	15.19	40.20
3 [#]	251.13	208.30	13.17	34.85
4 [#]	251.03	210.43	9.23	24.42

注: ΔH_c —熔融结晶焓。

2.4 微观形貌分析

图5为不同配比的ABS/PTT/PTTG复合材料的SEM照片。根据图5a可知,在PTTG质量分数为0时,PTT基质中可以观察到明显分布不均的ABS圆形粒子,且断面较为平整、光滑,分层现象不明显,断面存在清晰的凹凸变化,说明在无增容的条件下,ABS/PTT复合材料断面为典型的脆性断裂,二者的相容性较差,呈现出“海-岛”两相结构。从图5b、图5c可以看出,当PTTG分别加入质量分数为5%,观察到ABS粒子由原来的圆形散状分布转变为条状分布。当PTTG的质量分数为15%时,ABS呈现条状分布,相对PTTG质量分数为15%时更加明显,分散相的界面已变得模糊,表明PTTG起到了明显的增容作用,同时断面出现褶皱且变得粗糙,开始出现裂纹,密集的裂纹能有效分散或者缓冲来

自外部的能量冲击。断面逐渐出现韧性断裂特征,表明随着PTTG含量的增加,PTTG不仅起到了增容效果,而且使得材料的韧性增加,使ABS复合材料具备更高的抗冲击性。由5d可以看出,当PTTG的质量分数达到25%时,ABS粒子已基本消失,断面出现裂纹明显增多,存在明显的屈服现象,说明PTTG对复合材料的有较好的增容作用,达到了预期的效果。



a—1[#];b—2[#];c—3[#];d—4[#]

图5 ABS/PTT/PTTG复合材料条断面SEM照片

2.5 ABS/PTT/PTTG复合材料力学性能分析

图6是ABS/PTT的质量配比为1:1时,PTTG含量对复合材料的拉伸性能与弯曲性能影响。由图6可以看出,在ABS占比不变的条件下,复合材料的拉伸强度和弯曲强度随着PTTG含量的增加都呈现逐渐降低的趋势。值得注意的是,当PTTG的质量分数超过15%时,PTTG对ABS/PTT/PTTG复合材料的弯曲和拉伸性能影响变小。这可能是因为当PTTG的含量达到一定值后,分子结构中的刚性分子环己烷基的存在提高了整体分子链的刚性。同时,PTTG的加入降低了复合材料的流动性,交联作用增加了分子间的联系,导致分子间的物理缠结密

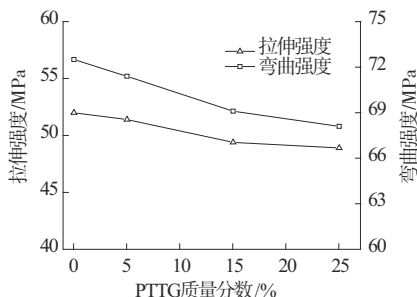


图6 PTTG不同质量分数时ABS/PTT/PTTG复合材料拉伸与弯曲强度

度变大,分子链不易发生滑移。当受到外力作用时,刚性分子阻碍了柔性分子的运动,从而降低了复合材料的拉伸和弯曲性能。

图7是基于悬臂梁冲击试验机对共混样条进行悬臂梁冲击强度实验数据分析结果。由图7可以看出,随着PTTG含量的增加,复合材料的冲击强度呈现出先降低后升高的变化趋势。当ABS/PTT/PTTG材料中的PTTG质量分数为0%~5%时,复合材料的冲击强度低于ABS/PTT复合材料,其原因可能是当PTTG的加入较少时,ABS与PTT的相容较差导致PTTG在基质中分散不均匀,分子链段不能较好地分散并嵌入PTT链段中,破坏ABS/PTT复合材料原有的分布状态,从而导致材料的缺口冲击强度出现下降的趋势。当PTTG投入量超过5%时,复合材料的冲击强度随着PTTG含量的增加逐渐提升且幅度较大,当PTTG的质量分数为25%时,ABS/PTT/PTTG复合材料的缺口冲击强度由 3.4 kJ/m^2 增加到 4.4 kJ/m^2 ,提高了29.41%。说明PTTG共聚酯对复合材料起到明显的增韧作用,其主要原因可能是在共混挤出的过程中,PTT分子结构中的苯环与PTTG分子结构中的环己烷之间相容性得到明显改善并促使二者之间产生了相互结合,结合后的大分子结构有效增强了复合材料的冲击性能。与此同时,在挤出过程中三种材料之间发生酯化反应,增加了各分子链的之间的紧密性,使复合材料整体的冲击性能变强。

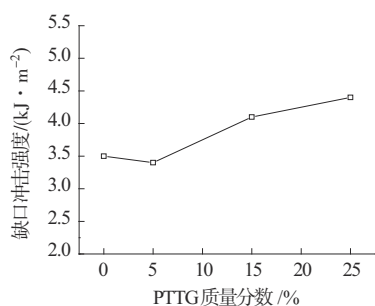


图7 PTTG不同质量分数时ABS/PTT/PTTG复合材料缺口冲击强度

3 结论

(1) ABS/PTT/PTTG复合材料的结晶能力随着PTTG共聚酯用量的增加而逐渐降低,同时PTTG起到了良好的增容作用,对复合材料的热稳定性及拉伸、弯曲性能无较大影响的前提下,降低了结晶度,提高了冲击强度和热稳定性,有利于复合材料的染色、加工及应用,达到预期的效果,拓宽了应用范围。

(2) 微观形貌分析表明,随着PTTG含量的增加,ABS/PTT复合材料的相容性有明显改善,同时对复合材料的韧性的提高也具有一定的促进作用。

(3) ABS/PTT/PTTG复合材料的拉伸及弯曲性能随着PTTG含量的增加存在逐渐降低的趋势,但整体变化不大。复合材料的缺口冲击强度随着PTTG含量的增加而逐渐升高,当PTTG的质量分数为25%时,复合材料的缺口冲击强度达到 4.4 kJ/m^2 ,相比未添加PTTG时提高了29.41%,起到明显的增韧效果。

参考文献

- [1] Roux Megan, Varrone Cristiano. Assessing the economic viability of the plastic biorefinery concept and its contribution to a more circular plastic sector[J]. *Polymers*, 2021, 13(22):3 883–3 894.
- [2] 陈家鑫,陈延明,王立岩,等. CHDM改性PTT共聚酯非等温结晶动力学研究[J]. *合成纤维工业*, 2021, 44(4):32–37.
Chen Jiaxin, Chen Yanming, Wang Liyan, et al. Study on non isothermal crystallization kinetics of CHDM modified PTT copolyester [J]. *China Synthetic Fiber Industry*, 2021, 44(4):32–37.
- [3] 余晓兰,汤建凯. 生物基聚对苯二甲酸丙二醇酯(PTT)纤维研究进展[J]. *精细与专用化学品*, 2018, 26(2):13–17.
Yu Xiaolan, Tang Jiankai. Research progress of bio based polyethylene terephthalate (PTT) fiber[J]. *Fine and Special Chemicals*, 2018, 26(2):13–17.
- [4] Sen A, Bhowal A, Datta S. Application of natural dye on polytrimethylene terephthalate fiber[J]. *Research Journal of Textile and Apparel*, 2019, 23(1):71–90.
- [5] 蒋晓东,王建坤,郭晶. 新型聚酯纤维PTT的研究进展[J]. *纺织科学与工程学报*, 2018, 35(4):167–170.
Jiang Xiaodong, Wang Jiankun, Guo Jing. Research progress of new polyester fiber PTT[J]. *Journal of Textile Science and Engineering*, 2018, 35(4):167–170.
- [6] Aburaisi S, Basha A, Al N K, et al. The colour stability of crystallized acetyl resin material in comparison to other restorative materials. An in-vitro study[J]. *BDJ Open*, 2021, 7(1). DOI: 10.1038/s41405-020-00055-0.
- [7] Jo A, Ssk A, Khk B, et al. Structural and physico-chemical properties change of polyethylene terephthalate (PET) fibers after supercritical fluid dyeing with C. I. disperse red 167-ScienceDirect[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2020(170). DOI: 10.1016/j.supflu.2020.105131.
- [8] McNeil Steve J, Hu Yi, Zaitseva Larissa I. A study of the ability of modified dyeing, and post-dyeing processes to increase the crystallinity of dyestuffs and the lightfastness of wool textiles[J]. *Key Engineering Materials*, 2015, 671. DOI: 10.4028.scientific.net/KEM.671.103.
- [9] 马鹏飞,王鑫,李栋辉,等. 聚合物共混物增容技术及发展[J]. *材料工程*, 2019, 47(2):26–33.

- Ma Pengfei, Wang Xin, Li Donghui, et al. Compatibilization technology and development of polymer blends[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(2):26–33.
- [10] Xue M L, Yu Y L, Chuah H H, et al. Miscibility and compatibilization of poly(trimethylene terephthalate)/acrylonitrile – butadiene – styrene blends[J]. *European Polymer Journal*, 2007, 43(9):3 826–3 837.
- [11] 李涛,孙剑,杨继搞,等. PTT/ABS合金的相形态及力学性能研究[J]. *工程塑料应用*, 2011, 39(10):18–22.
Li Tao, Sun Jian, Yang Jigao, et al. Study on phase morphology and mechanical properties of PTT/ABS alloy[J]. *Engineering Plastics Application*, 2011, 39(10):18–22.
- [12] 闰明涛,李鑫,王增坤,等. PTT/ABS-g-MAH共混合金的力学性能和流变行为[J]. *高分子材料科学与工程*, 2010, 26(10):92–94,98.
Run Mingtao, Li Xin, Wang Zengkun., et al. Mechanical properties and rheology behaviors of PTT / ABS-g-MAH blends[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2010, 26(10):92–94, 98.
- [13] Wang Wei, Yao Meng, Wang Haosen, et al. Mechanical property, crystal morphology, and nonisothermal crystallization kinetics of poly(trimethylene terephthalate)/maleinized acrylonitrile-butadiene-styrene blends[J]. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 2013, 52(4):574–589.
- [14] Braga Natália Ferreira, Ding Hao, Sun Luyi, et al. Antistatic packaging based on PTT/PTT-g-MA/ABS/MWCNT nanocomposites: Effect of the chemical functionalization of MWCNTs[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 138(11). DOI: 10.1002/app.50005.
- [15] Braga N F, La C A M, Liu B, et al. Influence of compatibilizer and carbon nanotubes on mechanical, electrical, and barrier properties of PTT/ABS blends[J]. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2019, 2(3):121–125.
- [16] 朱湘萍,于维才,陈利岩,等. 聚酯纤维级发光母粒的研制[J]. *合成纤维*, 2013, 42(2):36–38, 42.
Zhu Xiangping, Yu Weicai, Chen Liyan, et al. Development of polyester fiber grade luminous masterbatch[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2013, 42(2):36–38, 42.
- [17] Kakroodi A R, Kazemi Y, Nofar M, et al. Tailoring poly (lactic acid) for packaging applications via the production of fully bio-based in situ microfibrillar composite films[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 308: 772–782.
- [18] 蔡垚,吴红枚,刘武,等. PLA/ECP/ATBC三元共混复合材料的制备及其性能[J]. *塑料工业*, 2021, 49(2):139–144.
Cai Yao, Wu Hongmei, Liu Wu, et al. Preparation and properties of PLA/ECP /ATBC ternary blend composites[J] *China Plastics Industry*, 2021, 49(2):139–144.

(上接第40页)

- [12] 孙尧,鲍哈达,郭朝霞,等. 导电型高分子/碳纳米管复合材料研究[J]. *高分子通报*, 2011(4):34–41.
Sun Yao, Bao Hada, Guo Zhaoxia, et al. Research on conductive polymer/carbon nanotube[J]. *Polymer Bulletin*, 2011(4):34–41.
- [13] 杨建高,刘成岑,施凯. 渗流理论在复合型导电高分子材料研究中的应用[J]. *化工中间体*, 2006(2):13–17.
Yang Jiangao, Liu Chengcen, Shi Kai. Application of percolation theory for study of composite conductive polymeric materials[J]. *Chemical Intermediate*, 2006(2):13–17.
- [14] Sengun P, Tumerkan K M, Caglar M, et al. Characterization of designed, transparent and conductive Al doped ZnO particles and their utilization in conductive polymer composites[J]. *Powder Technology*, 2020, 374:214–222.
- [15] Wu J J, Buckley C P, O' Conner J J. Mechanical integrity of compression-moulded ultra-high molecular weight polyethylene: effects of varying process conditions[J]. *Biomaterials*, 2002, 23(17): 3 773–3 783.
- [16] Gao P, Mackley M R. The structure and rheology of molten ultra-high-molecular-mass polyethylene[J]. *Polymer*, 1994, 35(24):5 210–5 216.