

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.06.020

PTT 为分散相时 MMT 对 PC/PTT 结晶的调控作用

王文俊,张景阳,李娜,孙成,夏铭辰,王栋栋,薛美玲

(青岛科技大学高分子科学与工程学院,山东青岛 266042)

摘要: 鉴于聚对苯二甲酸丙二酯 (PTT) 与聚碳酸酯 (PC) 复合时结晶性能下降影响制品的快速生产,采用纳米蒙脱土 (MMT) 对 PTT 为分散相时 PC/PTT 复合材料的结晶性能进行了调控研究。差示扫描量热结果表明, MMT 对 PTT 分散相具有显著强于 PTT 为连续相时的突出结晶促进作用,且这种促进作用依据 PTT 含量的不同呈现出明显的差异性。透射电子显微镜和广角 X 射线衍射分析表明, MMT 对 PTT 分散相这种超强结晶促进作用的原因是其几乎全部以剥离状态分布在相界面上形成厚度为几十到上百个纳米的球状 MMT 层,该 MMT 层对 PTT 结晶具有超强的诱导成核能力。PTT/PC 的相容剂双酚 A 型环氧树脂使 MMT 的剥离性分散程度降低,沿界面择优分布性变差,不利于其结晶促进作用。

关键词: 聚对苯二甲酸丙二酯;聚碳酸酯;结晶;纳米蒙脱土

中图分类号: TQ323.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)06-0117-05

Crystallization Promotion Effect of Montmorillonite on PTT/PC Blends with PTT as the Dispersed Phase

Wang Wenjun, Zhang Jingyang, Li Na, Sun Cheng, Xia Mingchen, Wang Dongdong, Xue Meiling

(College of polymer Science and Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract : Based on the crystallization retardation of poly (trimethylene terephthalate)(PTT) when blending with polycarbonate (PC), which affects the rapid production, the crystallization of the PC/PTT blend with PTT as the dispersed phase was investigated by employing nano-montmorillonite (MMT) as a crystallization promoter. The differential scanning calorimetry results indicate that MMT shows a prominently stronger acceleration on the crystallization of PTT dispersed phase than the PTT continuous phase, and this promotion varies markedly with PTT content. Transmission electron microscope and wide angle X-ray diffraction results reveal that the reason of this prominent promotion on the crystallization is that the distribution of MMT which exfoliated almost completely is enriched along the phase interface forming a MMT layer of dozens to hundreds of nanometers thickness. This endows sections of the PTT dispersed phase with abundant nuclei and thus crystallization is promoted significantly. The bisphenol A-type epoxy resin, as a compatibilizer of the PTT/PC blend, makes the exfoliation extent of MMT be decreased and the selective distribution of MMT along the interface also become worse, which is not conducive to the crystallization promotion effect of MMT.

Keywords : poly(trimethylene terephthalate) ; polycarbonate ; crystallization ; montmorillonite

聚对苯二甲酸丙二酯 (PTT) 与聚对苯二甲酸丁二酯 (PBT) 和聚对苯二甲酸乙二酯 (PET) 同为聚酯家族三兄弟,是三大热塑性聚酯之一,1941 年由 Whinfield 和 Dickson 首次合成出来^[1]。它不但具有与 PET 和 PBT 相媲美的力学性能和加工性能,且制品表面光洁度和电气绝缘性能优于 PET 和 PBT^[2]。PTT 有别于 PBT 和 PET 的是其产业化进

程曾因原料 1,3- 丙二醇短缺和昂贵的价格而命运多舛,几度产业化又几度搁浅。直至 1995 年,Shell 将其重新产业化并于 1998 年以品牌 Cottera 开始产业化销售。2000 年之后杜邦收购 Shell PTT 业务,采用由玉米淀粉提取 1,3- 丙二醇的路线,生产生物基 PTT 并以品牌 Sorona 销售。

PTT 的结晶速率比 PBT 慢一个数量级,比 PET

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51173089)

通信作者: 薛美玲,教授,主要研究方向为聚合物成型加工中多层次结构的形成机制和结构控制

收稿日期: 2022-04-05

引用格式: 王文俊,张景阳,李娜,等. PTT 为分散相时 MMT 对 PC/PTT 结晶的调控作用 [J]. 工程塑料应用,2022,50(6):117-121, 135.

Wang Wenjun, Zhang Jingyang, Li Na, et al. Crystallization promotion effect of montmorillonite on PC/PTT blends with PTT as the dispersed phase[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(6):117-121, 135.

快一个数量级^[3];力学性能和玻璃化转变温度均介于PBT和PET之间,可用作纤维、工程塑料和薄膜。适中的结晶速率赋予其制品优良的光洁度,既无PBT快速结晶导致制品光洁度差的弊端,又无PET结晶过慢导致大型薄壁制件极易发生翘曲的尴尬。此外,PTT的突出性能特点是由分子构型赋予其有别于PBT和PET的超强弹性恢复性能,使之尤其适合用作高档地毯用纤维^[4]。

PTT用作工程塑料时,研究者和企业界通常将其与聚碳酸酯(PC)复合以进一步提高PTT的低温抗冲击性能^[5-8],期望能象PBT/PC复合材料一样在工程塑料领域获得更加广泛的应用,因而有关PTT与PC的复合、增容、熔融与结晶行为和酯交换反应的研究众多^[9-17]。课题组针对文献中对PTT/PC结晶的研究结果相差较大、观点不尽相同,以及快速结晶对其制品快速生产的重要性,对简单两相结构PTT/PC复合材料的结晶行为及其影响因素做了详细研究^[11]。系统考察了复合材料组成、剪切场、温度场、加工时间以及由此而决定的相形态/相界面对PTT/PC复合材料结晶行为的作用,阐明了PTT/PC复合材料结晶性能下降的真正原因是PC相和相形态/相界面而非酯交换反应与降解,剔除了文献中认为酯交换反应是导致PTT/PC结晶性能显著下降的解释。认为在通常加工过程中酯交换产物的量在可检测范围之外,不会对结晶性能产生明显影响,而复合材料颜色发黄的原因亦是因为降解而非酯交换。高温长时间混炼30 min以上以获得酯交换产物对实际生产毫无意义,借酯交换产物增容也是以严重牺牲力学性能、结晶性能和耐热性等为代价的舍本逐末行为。

PC对PTT结晶的影响呈现双重性^[11]。一是抑制PTT相结晶,抑制程度与PC含量、界面粘结以及界面面积有关,典型结果是当PC质量分数超过70%时PTT/PC不再显示结晶峰。二是PC对PTT结晶显示成核作用,典型结果是PTT/PC的峰值结晶温度随PC含量增加而移向高温,但PC的这种成核作用相比界面面积和良好界面粘结对PTT相结晶的抑制作用要逊色的多。在加工温度和剪切相同时,PC这两种作用的消长决定着复合材料的结晶行为。

鉴于PTT与PC复合时极易出现的结晶性能下降^[10-11,18],笔者采用纳米蒙脱土(MMT)对其进行了结晶调控。研究发现当PTT为连续相时:(1)

MMT极大地促进了PTT结晶^[19],譬如1% MMT可使70/30 PTT/PC的初始和峰值结晶温度分别向高温移动17℃和32℃,且结晶峰的半峰全宽减小了45%,结晶焓增加3.7 J/g。(2) MMT表面极性越强,对PTT的成核能力越强;极性表面MMT的分散性越好、粒度越小,对PTT的成核能力越强。(3)相对于MMT的表面性质,粒子尺寸和分散状态对球晶生长速率及结晶动力学影响更为显著。

在以上研究的基础上,笔者继续考察了PTT为分散相时MMT对PTT/PC结晶的调控作用,并与MMT对PTT连续相的结晶促进作用做了对比,由此分析了MMT对PTT分散相具有超强诱导成核能力的原因。也考察了PTT/PC的界面相容剂双酚A型环氧树脂对MMT结晶调控作用的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PTT: Sorona K1171, $\eta=1.02$ dL/g, 杜邦中国控股有限公司中国上海分公司;

PC: LG1201-15, 熔体流动速率(MFR)=15 g/10 min, LG化学中国上海有限公司;

双酚A型环氧树脂(E-03): 609, 天津市合成材料工业研究所有限公司;

有机改性纳米蒙脱土: Cloisite®25A, 美国南方粘土产品公司。

1.2 主要设备及仪器

转矩流变仪: Haake Rheocord 9000型, 赛默飞世尔科技(中国)有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪: DSC-204F1型, 耐驰科学仪器商贸(上海)有限公司;

扫描电子显微镜(SEM): JSM-6700F型, 日本电子光学实验室有限公司;

透射电子显微镜(TEM): JSM-2000EX型, 日本电子光学实验室有限公司;

广角X射线衍射(WAXD)仪: Rigaku D/max 2500型, 日本理学公司;

超薄切片机: Model MT-6000型, 美国DuPont公司。

1.3 试样制备

样品采用转矩流变仪熔融加工, 加工温度为250℃, 加工时间为10 min。熔融加工前, 将PTT和PC在120℃真空干燥12 h, MMT在85℃干燥2 h, 双酚A型环氧树脂在70℃干燥1 h。无MMT时采用一步法加工: 将PTT和PC同时放入转矩流变

仪中熔融混合。有 MMT 时采用两步法加工: 先将 PTT 与 MMT 熔融加工 3 min 后再加入 PC 和环氧树脂继续加工 7 min。加工结束后将物料快速取出、迅速压成厚度为 3~5 mm 的薄片并立即放入冰水中淬冷以冻结其相形态。淬冷后的样品于室温真空干燥后分别采用 DSC, SEM, TEM 和 WAXD 进行相关表征测试。

1.4 性能测试

DSC 测试: 在高纯氮气气氛下, 采用钢校正温度, 样品质量为 (7.5 ± 0.5) mg。测试程序为: 以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 从 0°C 升温到 270°C 并保持 5 min 后, 再以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的冷却速率冷却至 20°C 。

SEM 测试: 将干燥好的样品在液氮中脆断、断面喷金后, 采用 SEM 观察样品的断面相形貌。

TEM 测试: 采用超薄切片机将样品在室温超薄切片后, 采用 TEM 观察样品的相形态。仪器的加速电压为 200 kV。

WAXD 测试: MMT 在 PTT/PC 中的插层和剥离状态采用 WAXD 表征。测试条件为: Cu K α 靶 ($\lambda=0.154$ nm), 室温, 样品厚度为 2 mm, 加速电压 40 kV, 电流为 100 mA, 扫描范围为 $2\theta=(1\sim10)^\circ$, 步长为 0.02° 。

2 结果与讨论

2.1 PTT 为分散相时 MMT 对 PC/PTT 结晶性能的调控作用

图 1 为 PC/PTT 复合材料加工时纳米 MMT 对 PTT 结晶性能的调控作用, 相应的峰值结晶温度和结晶焓分别见表 1。表 1 数据表明, 在无 MMT 时, PC/PTT 的组成不同, 其结晶能力也明显不同。当 PTT 相的含量为 10~30 份时, DSC 曲线上无结晶峰出现, 表明 PTT 相的结晶被 PC 相完全抑制。PTT 含量为 40 份时, PTT 相在 175.8°C 显示一个结晶焓为 15.1 J/g 的结晶峰。该结晶焓的归一化结果为 37.8 J/g, 显著低于纯 PTT 的 49.8 J/g^[11], 表明 PC 明显地抑制了 PTT 结晶。

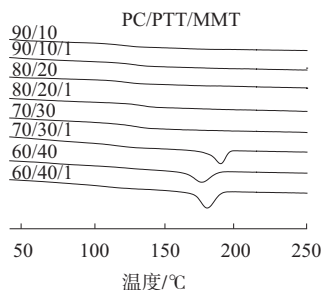


图 1 PTT 为分散相时 MMT 对 PC/PTT 复合材料结晶的影响

表 1 MMT 对 PC/PTT 结晶行为影响的 DSC 数据

体系	峰值结晶温度 $T_c/^\circ\text{C}$	结晶焓 $\Delta H_c/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$
PC/PTT/MMT (70/30/1)	189.2	12.3
PC/PTT/MMT (70/30/2)	190.3	12.9
PC/PTT (60/40)	175.8	15.1
PC/PTT/MMT (60/40/1)	179.6	18.4
PC/PTT (70/30)	161.8	38.7
PC/PTT/MMT (70/30/1)	177.0	40.0

图 1 表明, 若 PC 与 PTT 复合时加入 1 份 MMT, 则 MMT 对 PTT 分散相的结晶促进能力依据 PTT 相的含量不同, 呈现出明显的差异性。当 PTT 相含量为 10~20 份时, DSC 曲线依然无结晶峰出现, 表明 1 份 MMT 不能诱发 PTT 分散相结晶。当 PTT 相含量增至 30 份时, 则 1 份 MMT 使原本不显示结晶峰的 PTT 相在 189.2°C 显示一个结晶焓为 12.3 J/g 的强结晶峰, 表明 MMT 显著地促进了 PTT 相结晶。当 PTT 相含量增至 40% 时, 则 1 份 MMT 使峰值结晶温度向高温移动 3.8°C , 使结晶焓提高 3.3 J/g, 同样显示出对 PTT 相结晶的显著促进作用。此外, 图 1 还表明, 当 MMT 用量由 1 份增加到 2 份时, PC/PTT(70/30) 的峰值结晶温度和结晶焓均稍有增加, 这与 PTT 为连续相时 MMT 用量对结晶的影响结果一致^[19]。

2.2 MMT 显著促进 PTT 分散相结晶的机制

因 MMT 对 PTT 分散相突出的结晶促进作用, 进一步以 PC/PTT(70/30) 和 PTT/PC(70/30) 为例, 对比研究了 1 份 MMT 分别对 PTT 为分散相和 PTT 为连续相时复合材料的结晶促进作用, 相关结果见图 2 和表 1。

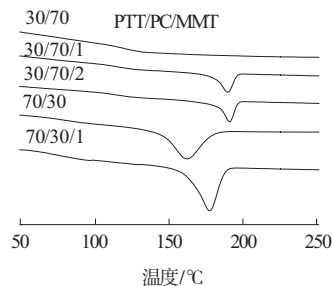
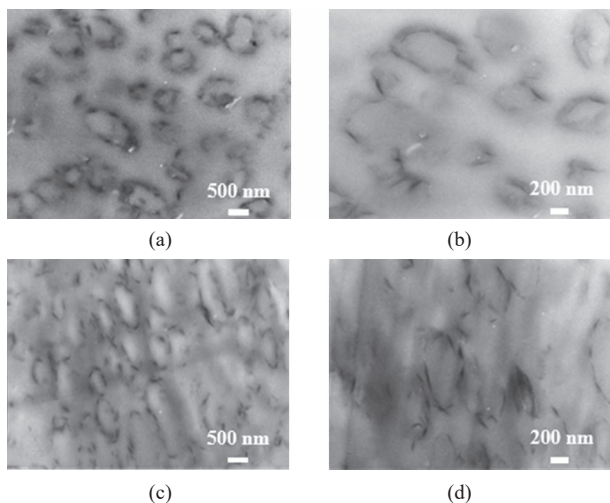


图 2 MMT 对 PTT 为分散相和连续相时复合材料的结晶调控作用

图 2 和表 1 数据表明, MMT 对 PTT 分散相的诱导成核能力显著强于 PTT 连续相, 体现为: PTT 为连续相时, 1 份 MMT 使 PTT/PC(70/30) 的峰值结晶温度向高温移动 15.2°C , 结晶焓增加 1.3 J/g; 而 PTT 为分散相时, 1 份 MMT 使原本不显示结晶峰的 PTT 相在 189.2°C 显示一个结晶焓为 12.3 J/g 的结晶峰。为究其因, 对相关样品分别做了 TEM 和

WAXD 测试 (图 3 和图 4), 以期从 MMT 在基体中的分布与分散情况找到差异性的根源。图 3 给出了 MMT 分别在 PC/PTT(70/30) 和 PTT/PC(70/30) 中分布和分散状态的 TEM 表征结果。图 3 表明, 尽管 MMT 在 PC/PTT(70/30) 和 PTT/PC(70/30) 样品中均倾向于分布于相界面上, 形成沿界面分布的 MMT 层, 但其在两种复合材料中的分布与分散情况却有着明显不同。首先, 由于 PC 相本征的熔体黏度比 PTT 大, 致使在相同加工条件下, PTT/PC(70/30) 样品中 PC 分散相的相畴尺寸比 PC/PTT(70/30) 中 PTT 分散相的相畴尺寸更为粗大, 使得 PC/PTT(70/30) 中的相界面面积要比 PTT/PC(70/30) 中的相界面面积大, 这给位于 PC/PTT(70/30) 相界面处的 MMT 诱导 PTT 结晶提供了更多的可能性。其次, MMT 在 PC/PTT(70/30) 样品中几乎全部分布在相界面上, 而在 PTT/PC(70/30) 中则是主要分布在界面上, 另有少部分分布在 PTT 连续相中。这是由于 MMT 在 PTT 相和 PC 相中呈现出差别的选择性分布所致。再者, 或许还是因为 PTT 和 PC 的熔体黏度差别, 使得在相同加工条件下 MMT 在 PC/PTT(70/30) 样品中几乎全部以剥离性分散状态分布在相界面上, 形成厚度为几十到上百个纳米的球状 MMT 层, 这无疑可以更好地诱导 PTT 成核结晶; 而在 PTT/PC(70/30) 样品中则仍有少部分 MMT 处于插层 - 未剥离状态; 且 MMT 在 PC/PTT(70/30) 中形成的 MMT 界面层厚而连续, 在 PTT/PC(70/30) 中的界面层薄而间断。



a, b—PC/PTT(70/30)(放大倍数: $\times 10\text{ k}$, $\times 20\text{ k}$);
c, d—PTT/PC(70/30)(放大倍数: $\times 10\text{ k}$, $\times 20\text{ k}$)

图 3 MMT(1 份)在 PC/PTT(70/30) 和 PTT/PC(70/30) 中分布与分散状态

MMT 在 PTT/PC 基体中分散状态的 WAXD 结果较好吻合了 TEM 结果, 见图 4 所示。MMT(001) 面的 2θ 衍射角在 PTT/PC 中已向低角度迁移至 2.71° , 表明分散在 PTT/PC 中的 MMT 其层间距已显著增大。PC/PTT/MMT(70/30/1) 且采用两步法加工样品的 (001) 面的衍射峰几乎消失, 表明 MMT 几乎全部发生剥离性分散, 而采用一步法加工样品的 (001) 面衍射峰却微弱可见, 表明仍有少量未发生剥离。相比而言, PTT/PC/MMT(70/30/1) 样品 (001) 面的衍射峰却明显存在, 表明未发生剥离的 MMT 数量明显多于 PC/PTT/MMT(70/30/1) 样品。综上, TEM 和 WAXD 结果均表明, MMT 在 PTT 为分散相的 PC/PTT 中更容易发生剥离性分散, 形成了更多成核点, 且 MMT 分别与两相表面性质的差别性使其更倾向于分布在 PC/PTT(70/30/1) 界面上形成厚而连续的球状 MMT 层, 这个呈剥离性分散的 MMT 层对 PTT 结晶富有超强的诱发作用, 使得相同用量的 MMT 对 PC/PTT(70/30/1) 的结晶促进能力显著强于 PTT/PC(70/30/1)。

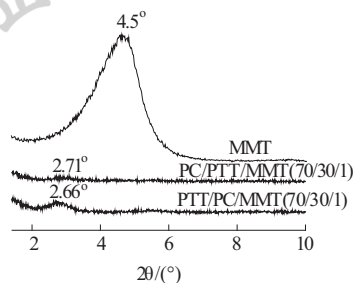


图 4 MMT 及其在 PC/PTT(70/30) 和 PTT/PC(70/30) 中分散的 WAXD 谱

2.3 界面改性剂对 MMT 促进 PTT 结晶的影响

鉴于双酚 A 型环氧树脂可有效改善 PTT 和 PC 之间的相容性^[20], 提高复合材料性能, 因此考察了 PC/PTT(70/30) 复合材料在 0.5 份的双酚 A 环氧树脂增容下, MMT 对 PTT 分散相的结晶促进作用, 其 DSC 结果如图 5 所示。由图 5 可见, 与非增容体系相比, 1 份 MMT 对 PTT 相的结晶促进作用反而稍下降, 表现为峰值结晶温度和结晶焓均稍降低。为此, 采用 TEM 对 MMT 在双酚 A 环氧树脂增容的 PC/PTT 中的分布与分散情况作了表征, 结果如图 6 所示。对比图 6 和图 3 可以发现, 加入环氧后不但 MMT 的剥离性分散程度降低, 且沿界面的择优分布性显著变差, 这势必影响其对 PTT 结晶的诱导成核能力, 导致 PTT 分散相的峰值结晶温度和结晶焓均降低。

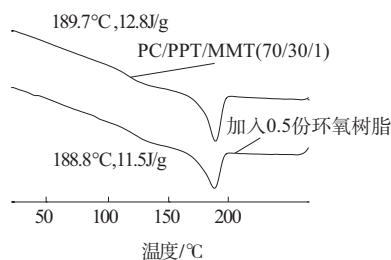


图5 环氧树脂改性剂对 PC/PTT/MMT(70/30/1) 结晶能力的影响

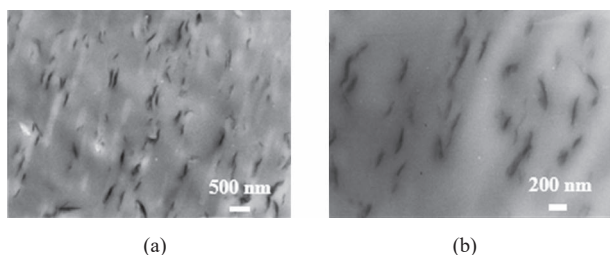
放大倍数: a— $\times 10\text{ k}$; b— $\times 20\text{ k}$

图6 环氧树脂增容时 MMT(1 份) 在 PC/PTT(70/30) 中的分散情况

3 结论

(1) MMT 对 PTT 分散相的结晶促进作用依据 PTT 相含量的不同呈现出明显的差异性。PC/PTT 质量比 60/40 时,1 份 MMT 使其峰值结晶温度向高温移动 15.2°C , 结晶焓增加 1.3 J/g ; PC/PTT 质量比 70/30 时,使原本不显示结晶峰的 PTT 相在 189.2°C 显示一个结晶焓为 12.3 J/g 的强结晶峰;当 PTT 相含量继续降低为 20~10 份时,则 1 份 MMT 不能再诱发 PTT 分散相结晶。

(2) MMT 对 PTT 分散相的诱导成核能力显著强于 PTT 连续相,体现为:PTT 为连续相时,1 份 MMT 使 PTT/PC(70/30) 的峰值结晶温度向高温移动 15.2°C , 结晶焓增加 1.3 J/g ; 而 PTT 为分散相时,1% MMT 使原本不显示结晶峰的 PC/PTT(70/30) 在 189.2°C 显示一个结晶焓为 12.3 J/g 的结晶峰。

(3) PTT/PC 的界面相容剂双酚 A 型环氧树脂使 MMT 的剥离性分散程度降低,沿界面的份择优分布性变差,不利于 MMT 的结晶促进作用。

参考文献

- [1] Dickson J T, Whinfield J R. Improvements relating to the manufacture of highly polymeric substances:578079[P].1946-06-14.
- [2] Xue M L, Sheng J, Yu Y L, et al. Nonisothermal crystallization kinetics and spherulite morphology of poly(trimethylene terephthalate)[J]. European Polymer Journal, 2004, 40(4):811-818.
- [3] Chuah H H. Crystallization kinetics of poly(trimethylene terephthalate)[J]. Polymer Engineering and Science, 2001, 41(2):308-313.
- [4] Wu J, Schultz J M, Samon J M, Pangelinan A B, et al. In situ study

of structure development in poly(trimethylene terephthalate)fibers during stretching by simultaneous synchrotron small-and wide-angle X-ray scattering[J]. Polymer, 2001, 42(16):7 141-7 151.

- [5] Xue M L, Sheng J, Chuah H H, et al. Miscibility, morphology and thermal properties of poly(trimethylene terephthalate)/polycarbonate[J]. Journal of Macromolecular Science-B physics, 2005, 43(5):1 045-1 061.
- [6] Chiu F C, Ting M H. Thermal properties and phase morphology of melt-mixed poly(trimethylene terephthalate)/polycarbonate blends-Mixing time effect[J]. Polymer Testing, 2007, 26(3):338-350.
- [7] 薛美玲,李涛,孙剑. PTT/PC 合金的动态力学行为研究[J]. 工程塑料应用, 2012, 40(9):72-75.
Xue Meiling, Li Tao, Sun Jian. Dynamic mechanical behaviors of poly(trimethyleneterephthalate)/polycarbonate (PTT/PC)blends[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(9):72-75.
- [8] 吕通建,常怀春,刘景丽,等. 新型 PC/PTT 共混合金性能的研究[J]. 中国塑料, 2007, 21(9):36-39.
Lyu Tongjian, Chang Huaichun, Liu Jingli, et al. Study on properties of novel PC/PTT alloy[J]. China Plastics, 2007, 21(9):36-39.
- [9] Xue M L, Yu Y L, Chuah H H. Reactive compatibilization of poly(trimethylene terephthalate)/polypropylene blends by polypropylene-graft-maleic anhydride. part 2. Crystallization behavior[J]. Journal of Macromolecular Science-B physics, 2007, 46(3):603-615.
- [10] Yavari A, Asadinezhad A, Jafari S H, et al. Effect of transesterification products on the miscibility and phase behavior of poly(trimethylene terephthalate)/bisphenol A polycarbonate blends[J]. European Polymer Journal, 2005, 41(12):2 880-2 886.
- [11] Xue M L, Lu X Zh, Yu X Y, et al. Influence of polycarbonate on the crystallization behavior of poly(trimethylene terephthalate)/polycarbonate blends[J]. Journal of Macromolecular Science-B physics, 2019, 58(3):452-468.
- [12] 薛美玲,孙剑,李涛. 酯交换反应对 PTT/PC 合金相形态、熔融与结晶行为的影响[J]. 工程塑料应用, 2012, 40(8):15-19.
Xue Meiling, Sun Jian, Li Tao. Effect of transesterification reaction on phase morphology, melting and crystallization behaviors of poly(trimethylene terephthalate)/polycarbonate blend[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(8):15-19.
- [13] González I, Eguiazabal J I, Nazabal J. Solid state structure and mechanical properties of melt mixed poly (trimethylene terephthalate)/polycarbonate blends[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 108(6):3 828-3 835.
- [14] Shafee E E, Naguib H F, Li L, et al. Crystallization and spherulitic growth kinetics of poly (trimethylene terephthalate)/polycarbonate blends[J]. Polymer Engineering and Science, 2010, 50(5):1 036-1 046.
- [15] Aravind I, Eichhorn K J, Komber H, et al. A study on reaction-

(下转第 135 页)

- Chen Jianxin, Ma Haiyan, Xu Yan, et al. Research advance on bio-based polypentanediamineadipate (PA56) fiber[J]. *New Chemical Materials*, 2021, 49(S1):286–288.
- [10] 陈丽. 戊二胺生物工业合成技术现状及发展意义 [J]. *河南化工*, 2021, 38(3):14–15.
- Chen Li. Current situation and development significance of biological industrialsynthesis technology of pentamethylene diamine[J]. *Henan Chemical Industry*, 2021, 38(3):14–15.
- [11] 李建伟, 朱国富, 王道波, 等. 基于戊二胺的半芳香族耐高温尼龙的合成与表征 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2021, 37(9):23–31.
- Li Jianwei, Zhu Guofu, Wang Daobo, et al. Synthesis and characterization of semi-aromatic heat-resistant nylon based on pentylenediamine[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2021, 37(9):23–31.
- [12] Novitsky T F, Lange C A, Mathias L J, et al. Eutectic melting behavior of polyamide 10, T-co-6, T and 12, T-co-6, T copolyterephthalamides[J]. *Polymer*, 2010, 51(11):2 417–2 425.
- [13] Davis R D, Jarrett W L, Mathias L J. Solution ^{13}C NMR spectroscopy of polyamide homopolymers (nylons 6, 11, 12, 66, 69, 610 and 612) and several commercial copolymers[J]. *Polymer*, 2001, 42(6):2 621–2 626.
- [14] Komber H, Voit B, Monticelli O, et al. H and ^{13}C NMR spectra of a hyperbranched aromatic polyamide from p-phenylenediamine and trimesic acid[J]. *Macromolecules*, 2001, 34(16):5 487–5 493.
- [15] 吴田田. 生物基尼龙 56 的结晶、动态热力学及流变性能研究 [D]. 上海: 东华大学, 2017.
- Wu Tiantian. The structure, dynamic thermo-mechanical and rheological properties of bio-based nylon 56[D]. Shanghai: Donghua University, 2017.
- [16] Ozawa T. Kinetics of non-isothermal crystallization[J]. *Polymer*, 1971, 12(3):150–158.
- [17] Jeziorny A. Parameters characterizing kinetics of nonisothermal crystallization of poly(ethylene-terephthalate)determined by DSC [J]. *Polymer*, 1978, 19(10):1 142–1 144.
- [18] 常欢, 叶南飏, 阎昆, 等. 原位共聚耐高温尼龙非等温结晶动力学研究 [J]. *塑料工业*, 2019, 47(S1):106–111.
- Chang Huan, Ye Nanbiao, Yan Kun, et al. Non-isothermal crystallization kinetics of in-situ copolymerization high temperature resistant nylon[J]. *China Plastics Industry*, 2019, 47(S1):106–111.
- [19] 刘结平, 莫志深. 聚合物结晶动力学 [J]. *高分子通报*, 1991(4):199–207.
- Liu Jieping, Mo Zhishen. Crystallization kinetics of polymers[J]. *Polymer Bulletin*, 1991(4):199–207.
- [20] 莫志深. 一种研究聚合物非等温结晶动力学的方法 [J]. *高分子学报*, 2008(7):656–661.
- Mo Zhishen. A method for the non-isothermal crystallization kinetics of polymers[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2008(7):656–661.
- [21] Kissinger H E. Variation of peak temperature with heating rate in differential thermal analysis[J]. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1956, 57(4):217–221.
-
- (上接第 121 页)
- induced miscibility of poly (trimethylene terephthalate)/ polycarbonate blends[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2009, 113(6):1 569–1 578.
- [16] Aravind I, Ahn K H, Ranganathaiah C, et al. Rheology, morphology, mechanical properties and free volume of poly (trimethylene terephthalate)/polycarbonate blends[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2009, 48(22):9 942–9 951.
- [17] Aravind I, Boumod A, Grohens Y, et al. Morphology, dynamic mechanical, thermal, and crystallization behaviors of poly (trimethylene terephthalate)/polycarbonate blends[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2010, 49(8):3 873–3 882.
- [18] Xue M L, Yu Y L, Sheng J, et al. Crystallization behavior of poly(trimethylene terephthalate)/polycarbonate blends[J]. *Journal of Macromolecular Science-B physics*, 2005, 44(4):531–547.
- [19] Xue M L, Liu Y J, Lv K H, et al. Prominent crystallization promotion effect of montmorillonite on PTT/PC blends with PTT as the continuous phase[J]. *Polymers*, 2020, 12(3):541–567.
- [20] Xue M L, Yu Y L, Sheng J, et al. Compatibilization of poly(trimethylene terephthalate)/polycarbonate blends by epoxy. Part 1. miscibility and morphology[J]. *Journal of Macromolecular Science-B physics*, 2005, 44(3):317–329.