

综 述

聚对苯二甲酸丙二醇酯 (PTT) 的研究

薛美玲¹, 于永良², 盛 京^{1*}

(1. 天津大学材料学院, 天津 300072; 2. 青岛科技大学应用化学系, 青岛 266042)

摘要: 新型聚酯材料聚对苯二甲酸丙二醇酯 (PTT) 是一种极有应用潜力的聚合物, 但在非纤维领域的研究与应用才刚开始。本文简要概述了其发展状况; 详述其结构、性能特点; 重点介绍 PTT 目前在非纤维领域的应用与研究进展。

关键词: 聚对苯二甲酸丙二醇酯; 共混改性; 混溶性

1 PTT 发展概述

PTT 是聚对苯二甲酸丙二醇酯 (图 1) 的英文缩写 [poly (trimethylene terephthalate)], 是由 1, 3-丙二醇与对苯二甲酸直接酯化后熔融缩聚或与对苯二甲酸二甲酯酯交换后熔融缩聚制得, 工业上也称 3GT, G 代表二元醇 (glycol), T 是指 (terephthalate), 3 代表 PTT 分子中的 3 个亚甲基单元, PTT 是三大脂肪族聚酯 (PET, PTT, PBT) 之一, 50 多年前由 Whinfield 和 Dickson^[1] 首次合成, 但 PTT 并没有象其它两种聚酯那样在过去的几十年间迅速发展成应用广泛的商用聚合物, 原因是生产原料之一 1, 3-丙二醇 (PDO) 的大批量工业化生产直至最近几年才解决, 在此之前, PDO 仅作为价格昂贵的精细化学品出售, 原料短缺以及昂贵的价格使 PTT 的产业化一直搁浅至 1995 年。

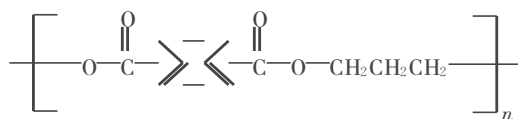


图 1 PTT 的分子结构式

很长时间以前, 纤维行业就意识到 PTT 的优良性能最适合作纤维。早在 1971 年 Fiber Industries, Inc. 的一份专利^[2]中就披露了 PTT 纤维具有低模量、高弯曲恢复率 (比 PET 大 90%)、高弯曲恢复功 (比 PET 大 30%) 等特性, 最适合作填料纤维和用于制造地毯。Ward 等^[3]曾对 PET、PBT、PTT 三大聚酯的机械性能做了对比研究, 发现 PTT 拉伸后的回弹率明显高于 PBT 和 PET, 而模量却远低于其它两种聚酯, 这是制造手感好的柔软弹性纤维^[4]和高抗压、高恢复力优质地毯^[5]难能可贵的两个特性。也正是由于 PTT 的这些优良性能, 才激发了化学和纤维两大工业致力于 PDO 工业化生产的技术性突破研究。

PDO 是无色透明液体, 沸点 214℃。20 世纪 70 年代, Shell Company 探索出了由丙烯醛生产 PDO

作者简介: 薛美玲, 35 岁, 女, 1996 年胶体与界面化学专业硕士毕业, 现为天津大学材料学院高分子材料专业博士生, 研究方向为高分子材料结构与性能;

* 通讯联系人

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

的工业化改进路线,使 PDO 生产成本大幅度降低,一度使 PTT 的生产和应用研究又一次活跃起来^[6~9],但 PDO 要作为原料来生产 PTT,价格仍然偏高,这使 PTT 的工业化开发又一次停止。最后 Shell Company 停止了 PDO 生产而 Degussa Company 仍继续致力于其生产研究。80 年代末,Shell 和 Degussa 公司都取得了生产 PDO 的技术性突破。Degussa Company 采用丙烯醛生产工艺,降低了 PDO 的生产成本,并将其纯度提高到聚合级,而 Shell Company 则采用由环氧乙烷与 CO 和 H₂ 组成的合成气通过羰基化反应来制取。1995 年,Shell Company 宣布 PTT 的成功产业化,随后, Du Pont Nemours & Company 也宣布,他们采用 Degussa Company 的 PDO 在德国 Weiling 建立了 PTT 生产厂,同时, Du Pont 联合 Genecore International Company 还力图共同研制一条有望更廉价的 PDO 生产线——由丙三醇发酵制备 PDO。这样,经过历时半个多世纪的合成探索,PTT 产业化终于成为现实。1998 年,PTT 商品开始批量销售,Shell Company 的 PTT 商业名称为 Corterra[®] Polymer, Du Pont Nemours & Company 为 Sorona[™] 3GT。

2 PTT 的性能

2.1 特性粘度和分子量

通常,聚酯的分子量用特性粘度 $[\eta]$ 来表示,粘度与分子量的关系符合 Mark-Houwink 方程:

$$[\eta] = KM^a$$

PTT 是快速结晶聚合物,熔融加工过程中即有 15%~30% 的结晶生成,通常能使 PET 溶解的溶剂都难以溶解 PTT,只有强极性溶剂如六氟异丙醇(HFIPA)或三氟乙酸与二氯甲烷的 1:1 混合液才能使之溶解,这给 PTT 的常规 $[\eta]$ 测定带来困难,六氟异丙醇价格昂贵;二氯甲烷具有挥发性,温度稍高,就难以维持与三氟乙酸 1:1 的比例;而苯酚与四氯乙烷质量比为 6/4 的混合物在 110℃ 能使 PTT 完全溶解,可用于 $[\eta]$ 测定。

2.2 结晶结构及结晶速率

类似 PBT 和 PET,PTT 也是半结晶聚合物,其结晶结构属三斜晶系,分子中三个亚甲基采取高度紧密排列的旁式—旁式构型^[10,11],分子链呈螺旋型,纤维等同周期的长度只有分子链若采取全反式伸展构象的 75.3%,而 PET 和 PBT 的纤维等同周期分别是其分子链全反式伸展构象等同周期的 99.5% 和 86.3%,所以 PET 分子看起来是伸展的,而 PTT 分子则呈锯齿型(见图 2),这种高度压缩的分子构型使 PTT 具有突出弹性。X-ray 衍射方法得到 PTT 晶链模量只有 2.59GPa^[12],分子中处于螺旋状态的亚甲基单元可在小范围内旋转,偏离旁式—旁式构型而不至于引起能量的显著增加,这使 PTT 分子能对外在的微小应力瞬时做出反应并立即发生形变。Jakeways 等^[13]运用广角 X-ray 衍射仪原位测定了当纤维破坏时沿纤维轴向纤维等同周期随应变的变化关系,发现 PTT 晶链在偏离衍射变形之前即沿应力方向发展了 4% 的应变,在晶格应变与外在应力关系图中,存在一临界应变,临界应变以下,变形可以完全恢复,这种可逆晶链变形正是聚合物具有高弹性恢复力的根源所在。

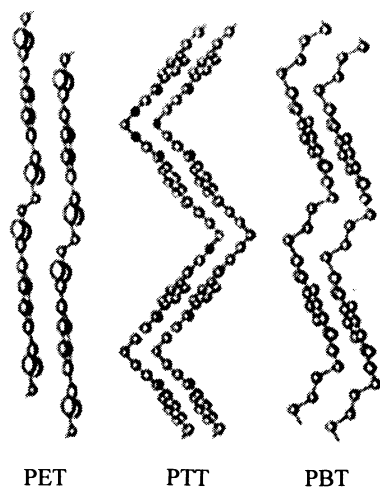


图 2 PET、PTT、PBT 的链构象侧面图

T_c 小于 463K 时,有两个熔融峰;当 $T_c=463\text{K}$ 时,低温处又出现一个小熔融峰;而 $T_c>473\text{K}$ 时,峰 I 突然消失,峰 II、峰 III 随 T_c 的升高逐渐变大并趋于融合直至 $T_c=488\text{K}$ 时融合为一个单峰。Chung^[19] 对多重峰的出现原因进行了分析,认为峰 III 是重结晶峰,峰 I、峰 II 是初始结晶熔融峰。

PTT 的结晶速率介于 PET 和 PBT 之间,在 $175^{\circ}\text{C}\sim 195^{\circ}\text{C}$ 间等温结晶时,Avrami 结晶速率常数 K 为 $10^{-3}\sim 10^{-2}\text{min}^{-n}$,比相同结晶条件下的 PET 大一个数量级,比 PBT 小一个数量级。骤冷的 PTT 熔体当温度升高到 T_g 以上时发生冷结晶现象,冷结晶速率比 PET 快得多, 71°C 即开始冷结晶^[15],1min 之内达到平衡结晶度的 80%,而 PET 在此温度下不发生冷结晶现象。

2.3 玻璃化转变与力学性能

PTT 的 T_g 与结晶度有关,结晶度小于 30% 时, T_g 稳定在 45°C 左右^[5];结晶度大于 30%, T_g 随结晶度增大迅速上升;当达 50% 的结晶度时, T_g 约为 70°C 。

粘弹谱显示有 3 个松弛峰^[16] (图 4), 70°C 左右的 α 松弛是 T_g 转变; -70°C 左右的 β 松弛是亚甲基单元为 2~10 的芳香族聚酯都具有的松弛^[17], 是由无定型区的羟基再取向以及羧基的局部运动所引起; -105°C 的 γ 松弛则是由 3 个以上连续亚甲基单元的协调运动产生的, γ 松弛与 β 松弛相重叠。结晶度大小对 β 松弛有影响。

PTT 的抗张强度、弯曲模量、冲击强度介于 PET、PBT 之间 (表 1), 应力-应变曲线如图 5 所示^[3]。拉伸性能取决于热历史和微观形貌以及在热拉伸过程中是否有冷晶生成。室温时, PTT 呈延性, 在 5.4% 应变时出现屈服, 应变达 360% 时, 发生应变硬化和断裂; T_g 以上, PTT 类似橡胶, 模量由 1140MPa 降至 12.9MPa, 断裂伸长率增至仅 600%; 75°C 时又重新变成延性, 模量突增至 189MPa, 拉伸能力下降, 应力-应变曲线与室温时相似。拉伸能力随温度的这些异常变化仅发生在从室温到 $T_g+30^{\circ}\text{C}$ 的窄小范围内, 原因是拉伸时有冷晶生成, 使模量增加, 这对拉伸过程不利, 当冷结晶速率增至一定程度时, PTT 会由橡胶态原位转变至类似室温时的延展态。若温度进一步升高, 冷结晶生成速率增加, PTT 进一步变脆, 导致拉伸失败。

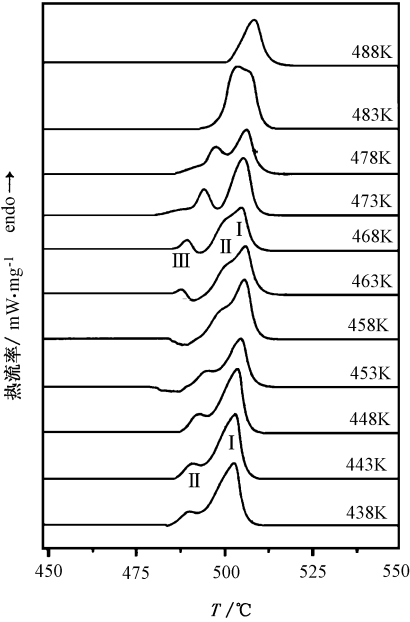
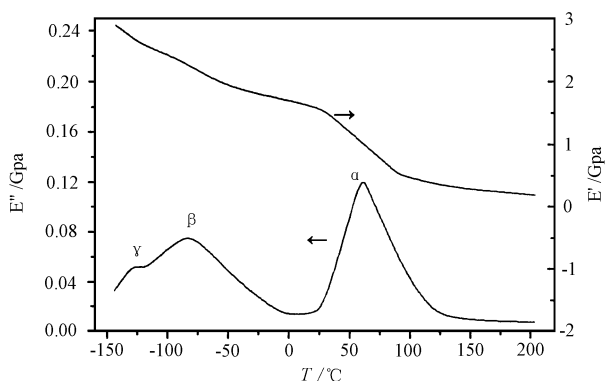
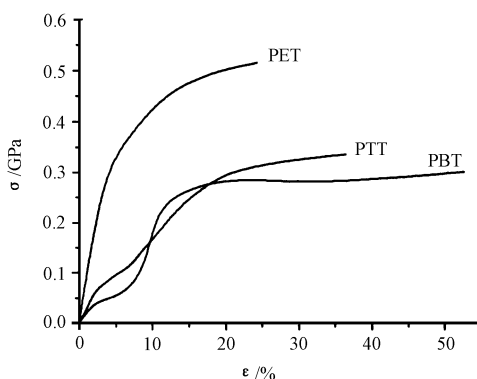


图 3 不同结晶温度下的 PTT 熔融行为 (DSC 升温速率, 10K/min)

表 1 PTT 与 PET、PBT 的性能比较^[41]

性能	PTT	PET	PBT
拉伸强度/MPa	67.6	72.5	56.5
弯曲模量/GPa	2.76	3.11	2.34
热变形温度/ $^{\circ}\text{C}$ (1.8MPa)	59	65	54
缺口冲击强度 J/m^2	48	37	53
比重	1.35	1.40	1.34
成型收缩率/%	2	3	2
介电强度 V/mil	530	550	400
介电常数 (1MHz)	3.0	3.0	3.1
损耗因子 (1MHz)	0.015	0.02	0.02

图 4 PTT 储能模量和损耗模量随温度的变化(11Hz)^[16]图 5 PTT、PET 和 PBT 的应力-应变曲线^[3]

2.4 熔体流变性

PTT 熔体流变行为类似 PET, 低剪切速率时近似牛顿流体, 剪切速率大于 1000s^{-1} 时, 出现剪切变稀。加工温度为 260°C 时与 PET 在加工温度为 290°C 具有相同的熔体粘度, 均为 $200\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。高剪切速率下, 其非牛顿指数低于 PET。熔体流动活化能类似 PBT, 小于 PET。熔体粘度对温度不敏感, 高温时降解速率大。

3 PTT 的研究现状

PTT 兼有 PET 和 PBT 二者的优良性能, 既有与 PET 相比拟的强度、硬度和热变形温度, 又具有与 PBT 相类似的加工性能(如熔融温度、加工温度、成型周期、模塑时可水冷), 是一种应用前景看好的聚合物。最近几年有关 PTT 的研究不再鲜见报道, 这其中大部分报道是关于 PTT 纤维方面的, 除此之外, 目前对 PTT 的研究主要集中在 PTT 及其共混物的结晶速率、共混物的混容性和 PTT 用作改性剂的应用研究等。

3.1 PTT 及其共混物的结晶速率

PTT 是半结晶聚合物, 研究其结晶性质和结晶速率对了解不同加工条件下的形态结构及性质, 以及对材料进行结构设计是很有必要的, 近年来有关这方面的报道不少^[18~21]。Chuah^[18] 运用 DSC 研究了 PTT 的等温结晶行为, 并与相同条件下的 PET、PBT 做了比较, 发现 PTT 的结晶速率介于 PET 和 PBT 之间, 且并不符合先前关于聚酯结晶速率的奇偶规律。Huang 等^[14] 也报道了 PTT 的结晶和熔融, 在设定的温度下结晶一段时间后, PTT 与 PET、PBT 一样也出现双熔融峰, 低温峰是初始结晶的熔融, 高温峰是重结晶, 峰温取决于结晶温度、结晶时间、从融态冷却时的冷却速率以及热处理过程的速率等。低冷却速率或高热处理速率时, 双峰合二为一, 只有熔融过程。但 WAXD 结果显示只有一种晶型, 即使出现双峰也是如此。Huang 和 Chang^[2] 研究了 PTT 的熔融结晶行为并与文献中有关 PET 和 PBT 的结晶参数作了比较, 他们报道 PTT 球晶生长速率为 $117.0\sim 4.7\mu\text{m}/\text{min}$, 分子链成核折叠能 $20.8\text{kJ}/\text{mol}$, 与 PBT^[39] 的 $20.92\text{kJ}/\text{mol}$ 接近, 但与 PET^[40] 的 $41.84\text{kJ}/\text{mol}$ 相差悬殊。Hong 等^[20] 对 Huang 和 Chang 的研究结果提出质疑, 他们认为分子链成核折叠能是分子柔顺性的反映, PTT 的成核折叠能应介于 PET 和 PBT 之间, 他们的研究结果是 $27.20\text{kJ}/\text{mol}$ 。

PTT 从熔态骤冷后质子自旋晶格弛豫时间增加, 说明 PTT 分子活动能力降低。Hong^[20] 发现 PTT 冷晶是以非依热成核的方式三维束状生长, Avrami 指数为 5, 而从熔态等温结晶的 Avrami 指数

随结晶温度不同在 2 到 3 之间变化,表明混合成核与生长机制。从熔态结晶时,最大结晶速率出现在 415K。晶体生长由 regime I→regime II 和由 regime II→regime III 转变的温度分别为 488K 和 468K。regime I、regime II 和 regime III 是 Hoffman 根据晶体表面二次晶核形成速率(i)和晶体生长扩散速率(g)的关系所划分的三个区,即生长方式 regime I、regime II 和 regime III, regime I 存在于过冷度低的高温结晶区, $i \ll g$; regime II 存在于过冷度较高的结晶区, $i \approx g$; regime III 存在于过冷度高的低温结晶区, $i \gg g$ 。当生长方式由 regime I→regime II→regime III 变化时,结晶形态也由轴对称球体或椭球体(图 6, a, b)→带状球体(图 6, c)→非带状球体变化(图 6, d),表明带状球体对成核机制很敏感。

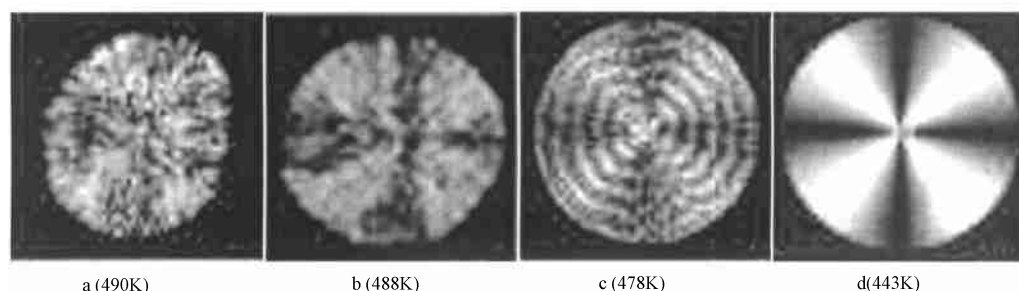


图 6 不同温度下 PTT 球晶的偏光照片^[20]

由于聚合物熔融加工过程是在剪切和非等温条件下进行,所以对 PTT 非等温结晶过程的研究更为重要,但这方面的公开报道并不多。作者研究了 PTT 在不同冷却速率下的结晶过程,用修正的 Avrami 方程进行了分析,当冷却速率由 5℃/min 增加到 25℃/min 时,最大结晶速率出现的温度从 171.1℃降到 136.9℃。Kim 等^[21]也报道了 PTT 的非等温结晶过程,Avrami 指数为 2.7,结晶活化能 165kJ/mol。

3.2 PTT 共混物的混溶性

PTT 与其它聚合物的混溶性研究不多,仅有与聚醚酰亚胺(PEI)^[22~24]、芳香族聚酯(PET^[25]、PEN^[26]、PTN^[27])、聚己酸内酯(PCL)^[28]的研究报道。Kuo 等^[23]的研究表明 PTT 与 PEI 在无定型区完全混溶,在整个组成范围内只有一个 T_g ,其大小及 DSC 曲线上的峰宽取决于共混物组成,这与 Jieh-Ming^[22]和 Woo^[24]的研究结果一致,当两组分的体积比为 0.5 左右时,出现一个非对称的尖峰,原因尚不清楚。Jieh-Ming^[22]认为,PEI 妨碍或完全阻止了 PTT 在 DSC 扫描过程中的重结晶;PEI 使 PTT 分子向晶体-熔体界面的迁移速率降低;在共混物的非等温结晶过程中,PTT 结晶温度的降低也依赖于共混物组成和冷却速率。PTT 与 PEN 的酯交换速率要快于 PET 或 PBT 与 PEN 的酯交换速率^[26], $m(\text{PEN})/m(\text{PTT})=45/55$ 的共混物熔融共混 5min 后, DSC 曲线显示一个 T_g ,混合 10min 后显示一个 T_m ,40min 后成为无规度为 0.78 的无规物,而 PET 或 PBT 与 PEN 的共混物在混合 5min 后依然有两个 T_g 。PTT/PTN^[27] [Poly(trimethylene naphthalate)] 的溶液共混物在整个组成范围内只显示一个 T_g ,表明无定形区完全相容,但两组分却分别结晶,温度升高可诱导酯交换反应发生。

3.3 PTT 作为共混组分在纤维方面的应用研究

PTT 具有突出的弹性恢复力,常作为性能改性剂与其它聚酯共混应用。这方面的文献主要是各种应用性专利。如 PET 与 PBT 共混,可制备具有独特拉伸及耐疲劳性能并可防翘曲的纱线,用于制造地毯、编织布及无纺布等^[29];制备易染色的双向拉伸薄膜^[30];制备低温热封薄膜^[31];PTT 与 PEN 共混制成的柔软薄膜可用于食品包装^[32];PTT 做壳材, PET 或 PBT 做芯材,制备具有不同弯曲

功能的纤维复合材料等^[33]。PTT 纤维表面被覆钛硅氧化物、有机硅烷聚合物、硅或氟氧化物,制备具有良好伸展性并具有持久吸味、抗菌、防尘功能的纤维^[34]。在 PTT 熔体中加入金属磺酸盐纺丝后用溶液进行表面处理可制成表面具有细小孔洞的 PTT 弹性纤维^[35]。

3.4 PTT 作为工程塑料的开发性研究

到目前为止,PTT 的应用还主要局限于纺织纤维和地毯纤维,因为 PTT 的几个突出性能尤其适合作纤维。其非纤维方面的应用开发研究才刚刚起步(如工程塑料、膜)或尚未开始,这是一个近乎空白的文献领域,只有为数不多的几个专利文献^[36~38]。PTT 树脂或玻璃纤维增强 PTT 树脂(GFRPTT)可注射成型成汽车零部件^[36]、电器元件^[37]、家庭用品^[38]。Shell Chemical Company 对玻璃纤维增强 PTT 树脂及其它树脂做了性能比较(表 2),GFRPTT 的弯曲模量是 GFRPBT 的 1.5 倍。尽管 GFRPTT 的拉伸强度和热变形温度比 GFRNylon 低,但聚酯工程塑料尤其适合对尺寸稳定性要求较高的潮湿环境,PTT 作为工程塑料应用还应解决热变形温度低、高温模量低、低温冲击强度差等问题。

表 2 几种玻璃纤维增强的热塑性工程塑料性能比较^[36]

性能	PET 28 ^b	PTT 30 ^b	PBT 30 ^b	Nylon 66 ^c	PC 30 ^b
拉伸强度/MPa	159	159	115	172	131
弯曲模量/GPa	8.97	10.35	7.60	9.00	7.59
热变形温度/℃(1.8MPa)	224	216	207	252	146
缺口冲击强度/(J·m ⁻²)	101	107	85	107	107
比重	1.56	1.55	1.53	1.39	1.43

b—玻璃纤维%(wt):c—玻璃纤维 33%(wt)

参考文献:

[1] Dickson J T, Whinfield J R. GB, 578079, 1946—06—14.
[2] Fiber Industries Inc. GB, 1254826, 1971—11—24.
[3] Ward I M, Wilding M A, Brody H. J Polym Sci, Polym Phys Ed, 1976, 14, 263~274.
[4] Heschmeyer C. Int Fiber J, 2000, 15(4): 66~72.
[5] Chuah H H, Brown H S, Dalton P A. Int Fiber J, 1995, 10(5): 50~58.
[6] Harris M E. US, 3584103, 1971—06—08. (to E. I. Du Pont de Nemours and Company).
[7] Kuratsuji T, Kawase S. US, 3984600, 1976—10—05. (to Teijin Ltd).
[8] Takatoshi K, Takanori U, Wataru F. JP, 51—140992, 1976—04—12. (to Teijin Ltd).
[9] Takatoshi K, Shoji K. JP, 52—005320, 1977—01—12. (to Teijin Ltd).
[10] Desborough I J, Hall I H, Neisser J Z. Polymer, 1979, 20, 545~552.
[11] Moss S, Dorset D L. J Polym Sci, Polym Phys Ed, 1982, 20, 1789~1804.
[12] Nakamae K, Nishio T, Hata K, et al. Zairyo, 1986, 35, 1066~1073.
[13] Jakeways R, Ward I M, Wilding M A, et al. J Polym Sci, Polym Phys Ed, 1975, 13, 799~813.
[14] Huang J H, Ju M Y, Chu P P, et al. J Polym Res, 1999, 6, 259~266.
[15] Bulkin B J, Lewin M, Kim J. Macromolecules, 1987, 20, 830~835.
[16] Gonzalez C C, Perena J M, Bello A. J Polym Sci, Part B, Polym Phys Ed, 1988, 26, 1397~1408.
[17] Farrow G, McIntosh J, Ward I M. Die Makromolekulare Chemie, 1960, 38, 147~158.
[18] Chuah H H. Polym Eng Sci, 2001, 41(2): 308~313.
[19] Chung W T, Yeh W J, Hong P D. J Appl Polym Sci, 2002, 83(11): 2426~2433.
[20] Hong P D, Chung W T, Hsu C F. Polymer, 2002, 43, 3335~3343.

- [21] Kim Y H, Kim K J, Lee K M, J Korean Fiber Soc, 1997, 34, 860~865.
- [22] Huang J M, Chang F C, J of Appl Polym Sci, 2002, 84(4), 850~856.
- [23] Kuo Y H, Woo E M, Kuo T Y, Polymer J, 2001, 33(12), 920~926.
- [24] Woo E M, Wu P L, J Polym Sci, Part B, Polym Phys, 2002, 40(15), 1571~1581.
- [25] Oppermann W, Hirt P, Fritz C, Chemical Fibers International, 1999, 49(1), 33~35.
- [26] Shin D Y, Kim K J, Yoon K J, Han 'guk Somyu Konghakhoechi, 1998, 35(12), 731~738.
- [27] Kim Y H, Choi J W, Cho J W, et al, Polym Mater Sci Eng, 2001, 85, 373~374.
- [28] Lim K Y, Yoon K J, J Korean Fiber Soc, 2000, 37(9), 500~510.
- [29] Fritz C, Hirt P, Oppermann W, et al, WO, 2000015886—A1, 2000—03—23.
- [30] Paek S H, Song G S, JP, 2001206963—A2, 2001—07—31.
- [31] Kurian J V, Hahn D M, Smillie B A, US, 20020012807—A1, 2002—01—31.
- [32] Tan Junji, JP, 2001055497—A2, 2001—02—27.
- [33] Yanagihara M, Aisaka H, JP, 2002054034—A2, 2002—02—19.
- [34] Hirata M, Matsuda I, Honda H, JP, 2002030568—A2, 2002—01—31.
- [35] Tomoyoshi (Teijin Ltd., Japan), Jpn Kokai Tokkyo Koho, JP, 2001355128—A2, 2001—12—26.
- [36] PTT resin vies in engineering thermoplastic market Source: Modern Plastics, 74, 14 Dec 1997, p97, 0026~8275.
- [37] Matsumoto H, Yamaguchi K, Inoue S, JP, 11054189, 1999—02—26.
- [38] Kawaguchi K, Nakane T, Hijikata K, JP, Application 05—031789, 1993—02—09.
- [39] Runt J, Miley D M, Zhang X, et al, Macromolecules, 1992, 25, 1929~1934.
- [40] Antwerpen F V, Van Krevelen D W, J Polym Sci, Polym Phys, 1972, 10(12), 2423~2435.
- [41] Dangayach K, Chuah H, Gergen W, et al, Pros SPE 55th Ann Tec Conf & Exhibits, 1997, 2097.

The Study on Poly(Trimethylene Terephthalate)

XUE Mei-ling¹, YU Yong-liang², SHENG Jing¹

(1. Material Science and Technology School, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Qingdao University of Science and Technology, Department of Applied Chemistry, Qingdao 266042, China)

Abstract: Poly(trimethylene terephthalate) (PTT), a new material, is a promising polymer with potential applications. However, the studies and applications of PTT in nonfiber fields are at its initial stage. The evolution of PTT is introduced in brief, and the characteristic of its properties and structures is discussed in detail. The advance of the research and applications of PTT in nonfiber fields are primarily reviewed.

Key words: Poly(trimethylene terephthalate); Blend modification; Miscibility