http://pmse.scu.edu.cn

Boltorn 型超支化聚酯对聚碳酸酯的增韧增强及增塑作用

帖 锐[1], 韩易达[1], 靳玉娟[1], 蒋苏臣[1,2], 李召勇[3]

(1. 北京工商大学 轻工科学与工程学院, 北京 100048; 2. 扬州惠通新材料有限公司, 江苏 扬州 225000;
3. 德州市知识产权保护中心, 山东 德州 253000)

摘要: 文中针对聚碳酸酯(PC)韧性欠佳、熔体流动性差等问题,以三羟甲基丙烷(TMP)为核、2,2-二羟甲基丙酸(DMPA)为单体,通过一步法合成了端羟基超支化聚酯(HBPE),并将其作为物理改性剂引入 PC 基体。该研究通过对 PC/HBPE 进行共混改性,并对所得共混物的结构与性能进行系统表征,协同优化 PC 的强度、韧性及加工流动性。随着 HBPE 含量增加,PC/HBPE 共混物的玻璃化转变温度从 147.5 ℃降至 130.7 ℃,表明 HBPE 的加入提高了 PC 链段的柔性;当 HBPE 含量为 2 phr 时,PC/HBPE 共混物的拉伸强度为 64.6 MPa,相较于纯 PC 提升了 7.1%;当 HBPE 含量为 5 phr 时,PC/HBPE 共混物的断裂伸长率、缺口冲击强度和拉伸韧性较纯 PC 分别提升了 29.4%,136.8% 和 59.3%,HBPE 的加入使 PC 实现了同步增韧增强;当 HBPE 含量为 5 phr 时,熔体流动速率相较于纯 PC 提高了 288.4%,HBPE 的加入降低了 PC 的熔体黏度。HBPE 是一种优异的增韧增强增塑改性剂,具有广阔的应用前景。

关键词: 聚碳酸酯;端羟基型超支化聚酯;熔体黏度;韧性
中图分类号: TQ323.4^{+}1 **文献识别码:** A **文章编号:** 1000-7555(2026)04-0012-09

聚碳酸酯(PC)以其卓越的抗冲击性、出色的抗蠕变性、优异的耐热性能、高的尺寸稳定性以及极低的吸水率[1],广泛应用于电子电器、板材薄膜、汽车制造、航空航天、光学仪器及家用电器等领域[2]。但 PC 分子链中大量的苯环使其柔韧性不足、流动性较差及熔体黏度较高[3]。诸多学者通过熔融共混方法对 PC 进行了改性研究。李益俊等[4]采用玻纤改性 PC,当添加 10% 玻纤时,共混物拉伸强度提升了 75.0%,但随着玻璃纤维含量增加,共混物的流动性逐渐降低;Lin 等[5]研究发现,在玻璃纤维增强 PC/ABS 体系中添加 6% 乙烯-丙烯酸甲酯(EMA)可使冲击强度提高 69.7%,但熔体指数呈现持续下降趋势;Garhwal 等[6]采用苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯共聚物(SEBS)改性 PC,当 SEBS 添加量为 12% 时,冲击强度从 88.2 kJ/m^2 增至 90.9 kJ/m^2,但拉伸强度降低。研究表明,通过不同改性方法可以显著提升 PC 的力学新能,但难以实现 PC 的强度、韧性及流动性的协同优化。

超支化聚合物(HBP)具有良好的热稳定性、低黏度、大量的空腔结构和大量的末端官能团[7,8],近似树枝状的几何外形,且可根据需求对其末端基团进行设计[8]等特点,被用于多种材料的增韧增强[9]增塑[10]研究。刘晶如[11]采用端十八烷基超支化聚酯(HBPE-2)与聚氨酯进行共混改性,发现当 HBPE-2 加入量为 30% 时,聚氨酯/HBPE-2 体系的拉伸强度提高了 1.4 倍,断裂伸长率提高了 7.6 倍,体系分子链缠结作用的增强起到了同步增强增韧的效果。本文通过“一步法”[12]合成了 Boltorn 型 HBPE,将其与 PC 材料进行熔融共混,利用 HBPE 大量末端羟基与 PC 分子链间的氢键作用,在降低 PC 熔体流动性的同时达到增强增韧的效果。

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0065
收稿日期: 2025-04-28
通讯联系人: 靳玉娟, 主要从事生物基及高性能高分子材料研究, E-mail: jinyujuan@th.btbu.edu.cn

1　实验部分

1.1　原料与设备

PC:PC-101,中国台湾奇美实业股份有限公司;三羟甲基丙烷(TMP):分析纯,上海麦克林生化有限公司;2,2-二羟甲基丙酸(DMPA):纯度 99%,上海阿拉丁生化科技有限公司;对甲苯磺酸(p-TSA):分析纯,上海麦克林生化有限公司。

电子万能试验机:CMT2104,深圳新三思计量技术有限公司;组合式数显冲击试验机:XJZ-50,承德试验机有限责任公司;熔体流动速率仪:XNR-400,承德市金建检测仪有限公司;热压机:LP-S-50,瑞典 Labtech 工程公司;差示扫描量热仪(DSC):Q20,美国 TA 仪器公司;热重分析仪(TGA):Q50,美国 TA 仪器公司;傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR):Nicolet iZ10,美国 Thermo Scientific 公司;转矩流变仪:XSS-300,上海科创橡胶有限公司;旋转流变仪:MARS,美国 Thermo Scientific 公司;扫描电子显微镜(SEM):Quanta FEG,英国 FEI 公司。

1.2　样品制备

以三羟甲基丙烷为核,2,2-二羟甲基丙酸为单体,采用一步法合成 HBPE[12]。分别称取 5 phr 150 g PC,倒入 5 个托盘中,将其分别与 0 phr,1 phr,2 phr,3 phr 和 5 phr HBPE 共混。将共混物在 80 ℃真空干燥 6 h。随后,在转矩流变仪中对原料进行熔融共混,温度设置为 260 ℃,转速设置为 60 r/min,时间设置为 8 min。采用热压机将共混物压制成尺寸为 150 mm×10 mm×0.5 mm 的拉伸样条和 80 mm×10 mm×4 mm 的冲击样条,热压机上下板温度设置为 260 ℃,压力为 8 MPa,热压 6 min,取出样板后,室温冷却 3 min。

1.3　测试与结构

1.3.1　FT-IR 分析:将一定量干燥的溴化钾粉末与待测样充分混合后,用玛瑙研钵进行研磨,用压力机将共混粉末压成完整薄片,测试时的波数设置在 500~

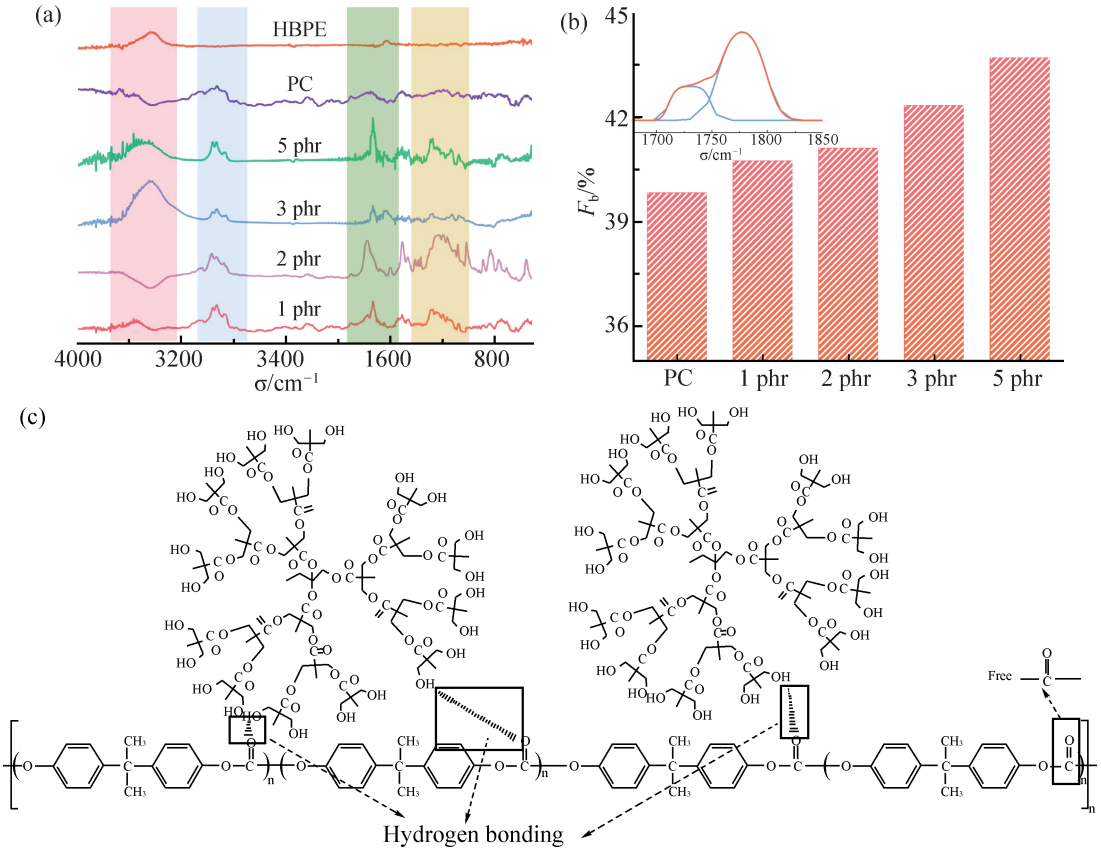


Fig. 1　(a) FT-IR of PC, HBPE and PC/HBPE blends; (b) fraction of hydrogen bonds of PC and PC/HBPE blends; (c) schematic of hydrogen bonding interaction of PC/HBPE blends

4000 cm^{-1} 之间，扫描次数设置为 32 次，分辨率为 2 cm^{-1}。

1.3.2 拉伸性能测试：按国标 GB/T 1040.3—2006 对 PC/HBPE 样条进行测试。拉伸速率为 5 mm/min，L=50 mm，d=10 mm。

1.3.3 冲击强度测试：根据国标 GB/T 1843.1—2008 测试。用 2 J 的摆锤进行 5 组试样的冲击强度测试，将各组的实验结果求取平均值作为冲击强度。

1.3.4 流变性能分析：使用旋转流变仪测试恒温条件下 PC/HBPE 共混物的黏度、储能模量和损耗模量随角频率的变化。测试温度为 260 ℃，角频率为 0.1~100 rad/s，共测量 20 个点。

1.3.5 熔融指数（MFI）测试：根据国标 GB/T 3682—2000 对 PC/HBPE 共混物进行测试。测试温度为 300 ℃，负荷为 1.2 kg，挤出物切断时间为 10 s。

1.3.6 SEM 表征：样条冲击试验的断面置于 10 kV 的工作电压下进行喷金处理，表征拉伸断面的表面形貌。加速电压为 1 kV，放大倍数为 1500 倍。

1.3.7 DSC 分析：取 5~10 mg 样品，在氮气氛围下快速升温至 300 ℃并保持 2 min 以消除热历史。随后以 15 ℃/min 的速率降温到 20 ℃并保持 2 min，再以 15 ℃/min 的速度升温至 300 ℃。

1.3.8 TGA 分析：称取 PC/HBPE 共混物 3~5 mg 置于坩埚中，在氮气气氛下，以 20 ℃/min 速率从室温升至 600 ℃，在氮气气氛下，以 20 ℃/min 速率从室温升至 600 ℃，氮气速率为 70 mL/min，记录样品的 TGA 和 DTG 曲线。

2 结果与讨论

2.1 结构分析

Fig.1(a)为 HBPE，PC 及 PC/HBPE 共混物红外光谱图。3670 cm^{-1} 和 3534 cm^{-1} 处特征峰分别对应

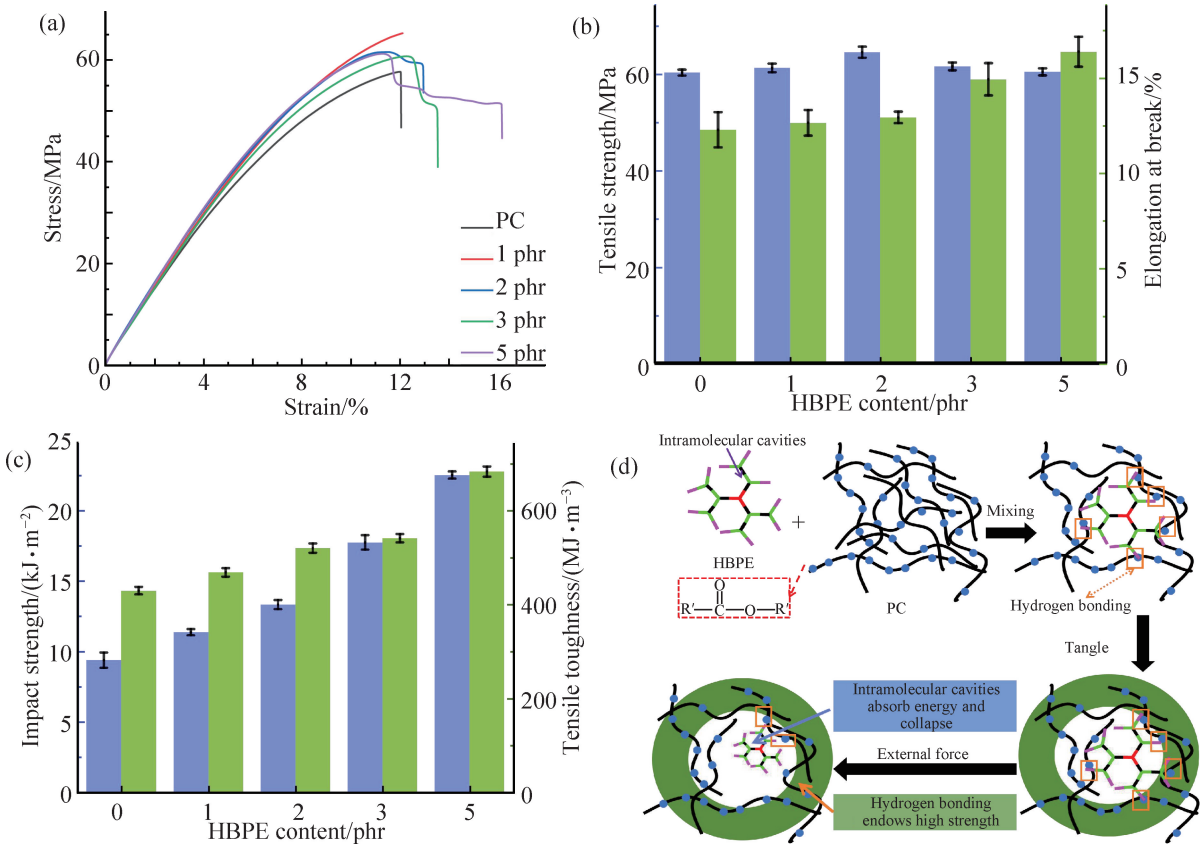


Fig. 2 Mechanical performance curve of PC/HBPE blend system

(a): stress-strain curve; (b): tensile strength and elongation at break; (c): impact strength curve and tensile toughness; (d): toughen mechanism

PC 和 HBPE 中羟基伸缩振动;3160 cm^{-1} 处的特征峰对应 PC 中甲基的伸缩振动;1770 cm^{-1} 和 1739 cm^{-1} 处的特征峰分别对应 PC 和 HBPE 中酯基的伸缩振动[13];1507 cm^{-1} 处的特征峰对应 PC 中苯环骨架的伸缩振动[14];1232 cm^{-1} 处的特征峰对应 PC 中 C—O 的振动[15];添加 HBPE 到 PC 中,1770 cm^{-1} 处的特征峰向低波段移动(从 1770 cm^{-1} 移动至 1731 cm^{-1})。产生这种现象的原因是 HBPE 中的端羟基与 PC 链段中的酯基形成了氢键,氢键作用越强,吸收能量越多,从而导致特征峰向低波段移动,其作用机理如 Fig.1(c)所示。

为测定氢键分数(F_b),采用红外光谱中羰基带在 1680~1800 cm^{-1} 范围内采用高斯/洛伦兹谱函数进行曲线拟合。Fig.1(b)为 PC/HBPE 共混物的氢键分数。计算过程如式(1)所示。从 Fig.1(b)可以看出,随着 HBPE 含量增加,氢键分数逐渐提高,进一步证明 HBPE 中的端羟基与 PC 中的酯基之间形成了氢键作用。

$$F_b=\frac{A_b}{A_b+1.5A_f} \tag{1}$$

式中:A_b 和 A_f——分别代表 PC/HBPE 共混物中红外光谱羰基峰中分峰得到的氢键缔合(Bound)羰基和自由(Free)羰基的峰面积;1.5——上述 2 个带的吸收比($r_{b/f}$),其范围为 1.25~1.75,具体取决于氢键强度,此处将 $r_{b/f}$ 取中间值 1.5 进行定量计算[16]。

2.2　力学性能分析

Fig.2(a~c)为 PC/HBPE 共混物的应力-应变曲线,拉伸强度和断裂伸长率及冲击强度和拉伸韧性柱状图,拉伸韧性计算公式如式(2)所示

$$\tau=\sum_{\varepsilon_x=0}^{\varepsilon_b=\varepsilon_x}\sigma\varepsilon_x \tag{2}$$

如 Fig.2(b)和(c)所示,PC 的拉伸强度、断裂伸长率和冲击强度分别为 60.3 MPa,12.5% 和 9.5 KJ/m^2。加入 HBPE 后,PC/HBPE 共混物相较于 PC 的拉伸强度略有提升,当 HBPE 含量为 2 phr 时,体系的拉伸强度达到最大值 64.6 MPa,随着 HBPE 含量继续增加,PC/HBPE 共混物的拉伸强度略有下降,但仍高于 PC,说明 HBPE 能够改善 PC 材料的强度。PC/HBPE 共混物的断裂伸长率、冲击强度和拉伸韧

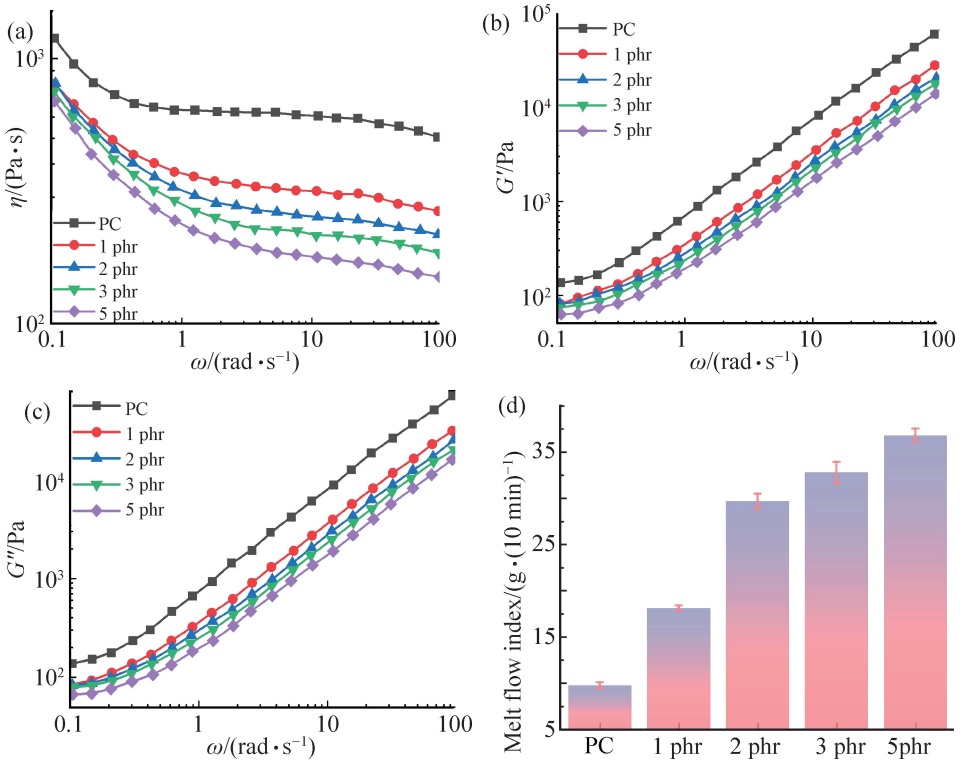


Fig. 3　Rheological variability curve of PC/HBPE blend system: (a) complex viscosity; (b) storage modulus; (c) loss modulus; (d) melt flow index

性随着 HBPE 含量的增加均逐渐增大，当 HBPE 含量为 5 phr 时，体系的断裂伸长率、冲击强度和拉伸韧性分别为 16.2%，22.5 KJ/m^2 和 683.3 MJ/m^3，相比于 PC 提高了 29.4%，136.8% 和 59.3%。表明 HBPE 改善了 PC 材料的韧性。HBPE 能够同时增强增韧 PC 的作用机理如 Fig.2(d)所示。HBPE 表面的端羟基与 PC 分子链中的酯基形成了致密的氢键网络，使其能够以分子尺度均匀分散于基体中而不发生相分离，这种独特的“原位增韧”效应源于 HBPE 分子作为超支化交联节点的特殊作用[17]；一方面，交联点附近增大的局部自由体积及其三维网络结构可有效实现应力重分布并促进塑性变形[18]；另一方面，HBPE 分子内部的空腔结构在外力作用下通过可逆形变吸收冲击能量，这种能量耗散机制使材料能够同时实现增强增韧[19]。

2.3 流变性能分析

Fig.3(a~c)为 PC 及 PC/HBPE 共混物的流变性能。如 Fig.3(a)所示，PC 和 PC/HBPE 共混物的黏度随剪切频率的增加而降低，呈现“剪切变稀”现象，表明 PC 和 PC/HBPE 共混物具有假塑性流体的特征。随着 HBPE 含量的增加，体系的黏度逐渐降低，这是由于 HBPE 三维球状结构降低了 PC 基体中分子链的缠结，起到解缠、润滑的作用[7]。如 Fig.3(b)所示，PC/HBPE 体系的损耗模量随剪切频率增加而增加，低频区的缓慢增长对应于分子链的完全弛豫，而高频区分子链的运动单元没有足够的时间调整构象以适应快速变化的外力，导致能量耗散增加[20]。如 Fig.3(c)所示，储能模量随着剪切频率的增加而增大，产生这种现象的原因是 HBPE 通过增大分子间距、减少链缠结以及促进分子链构象平衡，显著降低了共混物的弹性。因此，HBPE 能有效改善 PC 的流动性。

2.4 熔融指数分析

Fig.3(d)为 PC/HBPE 共混物的熔体流动速率。如图所示，PC 的熔体流动速率为 9.5 g/10 min，产生这种现象的原因是 PC 中含有苯环和极性羰基[21]，增大了分子间作用力，导致其分子链难以移动，分子链间易发生缠结。PC/HBPE 共混物的熔体流动速率随着 HBPE 含量的增加而增加，当 HBPE 的含量为 5 phr 时，体系的熔体流动速率为 36.9 g/10 min，与 PC 材料相比提高了 288.4%。产生这种现象的原因是 HBPE 的三维球状结构能够起到支撑作用，增大分子间距离，降低分子链的缠结。其次，HBPE 分子链中富含柔性烷基和醚键等链段，随着 HBPE 的加入，体系的柔性链占比显著增加，从而显著提升了材料的流动性。

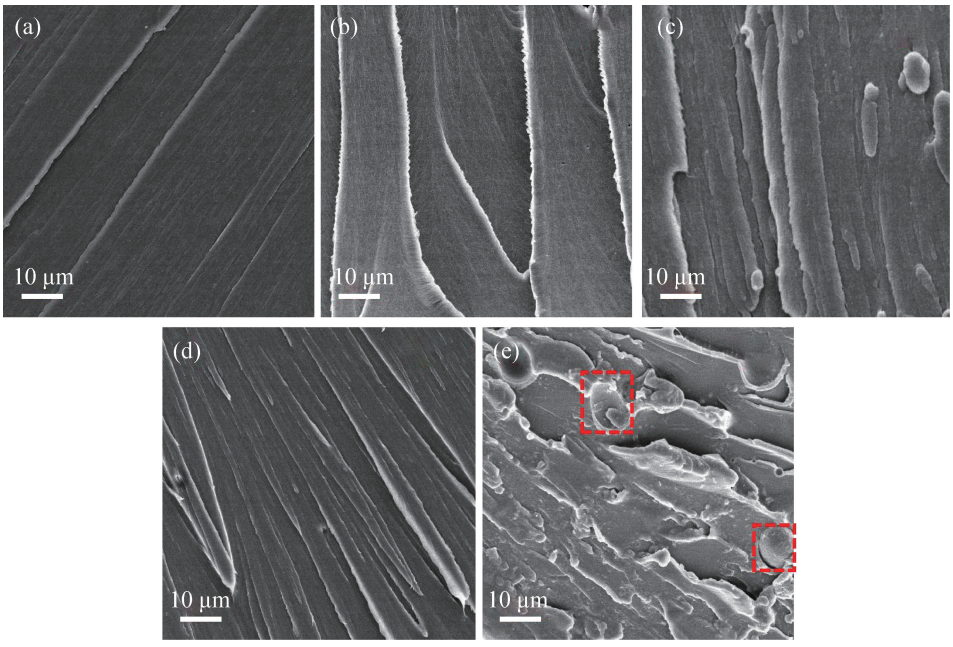


Fig. 4 SEM of PC/HBPE blends: (a) PC; (b) 1 phr; (c) 2 phr; (d) 3 phr; (e) 5 phr

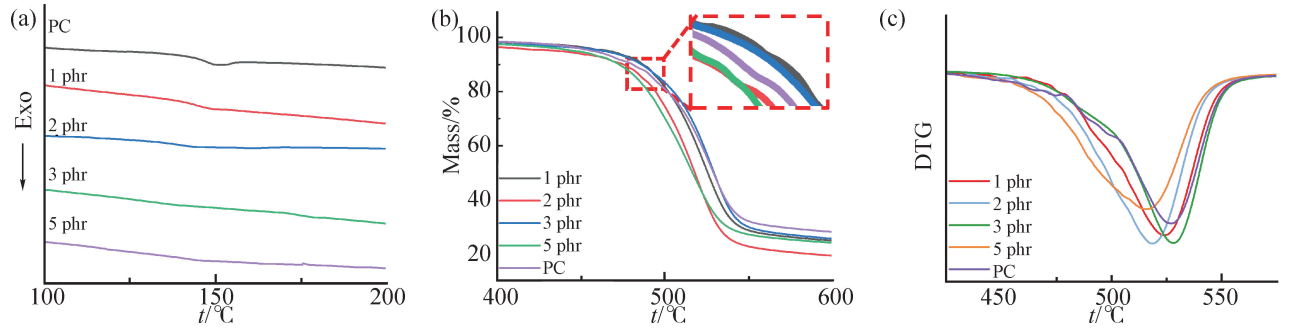


Fig. 5　Thermal performance of PC/HBPE blends: (a) DSC curve of secondary heating; (b) TGA; (c) DTG

Tab. 1　Thermal performance data of PC/HBPE blends

	T_g/℃	$T_{d5\%}$/℃	$T_{10\%}$/℃	T_{dmax}/℃
PC	147.5	456.8	480.8	526.3
1 phr	144.5	466.6	486.0	522.9
2 phr	140.5	436.2	475.4	518.3
3 phr	139.6	436.3	486.1	527.0
5 phr	130.7	446.4	472.8	516.0

2.5　微观形貌分析

Fig.4 为 PC 及 PC/HBPE 共混物冲击断面的扫描电镜图。从 Fig.4(a)中可以观察到,PC 断面虽有少量细微纹理但相对光滑,具有明显的脆性断裂特征。从 Fig.4(b~d)可以看出,随着 HBPE 含量增加,共混物断面变得粗糙且没有相分离,说明 PC 与 HBPE 相容性良好,HBPE 的加入增强了 PC 材料的韧性。从 Fig.4(e)中可以看出,当 HBPE 含量为 5 phr 时,PC/HBPE 共混物出现轻微的相分离(如红圈所示),这可能是由于过量的 HBPE 发生了自团聚[22],从而影响了材料的相容性。但如图所示,PC/HBPE 共混物的力学性能并未下降,反而进一步提升。产生这种现象主要是因为 HBPE 端羟基与 PC 酯基之间形成了氢键作用,且氢键分数随 HBPE 含量的增加逐渐提高。其次,HBPE 的空腔结构在受到外力冲击时能够吸收能量,进一步提升 PC/HBPE 共混物的韧性[23],由于上述 2 种作用的影响远高于 HBPE 自团聚产生的影响,因此,PC/HBPE 共混物的力学性能进一步提升。

2.6　热性能分析

Fig.5(a)为 PC 及 PC/HBPE 共混物的二次升温曲线。如 Tab.1 所示,PC 的玻璃化转变温度(T_g)为 147.5 ℃,随着 HBPE 含量的增加,玻璃化转变温度逐渐降低。当 HBPE 含量为 5 phr 时,T_g 为 130.7 ℃。这表明 HBPE 的加入改善了 PC 材料的柔性。产生这一现象的原因主要有 HBPE 的主体结构较为柔顺[24],具有更高的灵活性,其次,HBPE 独特的三维球状结构加大了分子链之间的距离,起到“支撑润滑”作用[25],进一步增强了 PC/HBPE 共混物的柔性。

Fig.5(b, c)为 PC/HBPE 共混物的 TGA 和 DTG 曲线。如 Tab.1 所示,加入 HBPE 后,PC/HBPE 共混物的热降解曲线始终只有 1 个转变平台,即共混体系只发生了 1 次降解,这说明 PC 与 HBPE 相容性较好,PC 的 $T_{d5\%}$(质量损失 5%时的温度)、$T_{d10\%}$(质量损失 10%时的温度)和 T_{dmax}(最大质量损失速率时的温度)分别为 456.8 ℃,480.8 ℃和 526.3 ℃。随着 HBPE 的加入,PC/HBPE 共混物的热分解温度呈现小幅度波动,但仍维持在 520 ℃左右,因此,HBPE 的加入不影响 PC 的加工与应用。产生这种现象的原因为:一方面,HBPE 的三维球状结构能够起到支撑作用,增大分子间距离,降低分子链的缠结与分子间的极性作用;另一方面,HBPE 的端羟基与 PC 酯基形成的氢键增强了分子链的稳定性,使热分解温度

升高。因此,在这 2 种反向作用的共同影响下,PC/HBPE 共混物的热分解温度出现波动性变化。

3 结论

以 TMP 为核,DMPA 为单体,采用一步法合成了 HBPE,并将 HBPE 作为改性剂添加到 PC 中进行熔融共混,对其共混物进行了系统表征,主要结果如下。

(1)HBPE 的加入显著改善了 PC 的韧性。当 HBPE 含量为 5 phr 时,共混物的断裂伸长率、冲击强度及拉伸韧性较纯 PC 分别提高了 29.4%,136.8% 和 59.3%,表现出显著的韧性提升。

(2)共混体系的 T_g 随 HBPE 含量的增加而下降,证明 HBPE 有效增强了 PC 分子链段的运动能力,提升了材料柔性。

(3)HBPE 改善了 PC 材料的流动性,当 HBPE 含量为 5 phr 时,熔体流动速率达到最大值 36.9 g/10 min,与纯 PC 相比提升了 288.4%。

(4)PC 的拉伸断面较光滑,表现为明显的脆性断裂,随着 HBPE 含量增加,PC/HBPE 共混物的冲击断面变得粗糙,表明 HBPE 能够提升 PC 材料的韧性。

参考文献:

[1] Rodrigues P V, Ramoa B, Castro M C R, *et al*. Investigation of toughening mechanisms in elastomeric polycarbonate blends through morphological and mechanical characterization at small and medium strain rates[J]. Polymers, 2024, 16: 2303.

[2] Srivastava J N, Gupta S K. Enhancement of properties of polycarbonates for low temperature applications[J]. Polymer-Plastics Technology and Materials, 2024, 63: 2277-2290.

[3] 李一搏, 盖景刚. 高透明耐溶剂性聚碳酸酯合金材料的制备[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(6): 33-38.
Li Y B, Gai J G. Preparation of polycarbonate alloy with high transparency and excellent solvent resistant[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(6): 33-38.

[4] 李益俊, 辛勇. 玻纤含量对玻纤增强聚碳酸酯微结构成型及力学性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(5): 27-31.
Li Y J, Xin Y. Effect of glass fiber content on microstructure and mechanical properties of glass fiber reinforced polycarbonate[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(5): 27-31.

[5] Lin J, Li J, Wang J J, *et al*. Effects of thermoplastic elastomer on the morphology and mechanical properties of glass fiber-reinforced polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene[J]. Polymer Engineering and Science, 2019, 59: E144-E151.

[6] Garhwal A, Maiti S N. Influence of styrene-ethylene-butylene-styrene (SEBS) copolymer on the short-term static mechanical and fracture performance of polycarbonate (PC)/SEBS blends[J]. Polymer Bulletin, 2016, 73: 1719-1740.

[7] Shi J H, Zhang X R, Weng L, *et al*. High toughness and excellent electrical performance bismaleimide resin modified by hyperbranched unsaturated polyester of flexible aliphatic side chains[J]. High Performance Polymers, 2021, 33: 695-703.

[8] Jin Y J, Weng Y X, Li X X, *et al*. Effect of blending with polyamidoamine (PAMAM) dendrimer on the toughness of poly (hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) (PHBV)[J]. Journal of Materials Science, 2015, 50: 794-800.

[9] Zhou S Y, Jin Y J, Guo M L, *et al*. Synergistic toughening and strengthening of PBAT/TPS blends by microcrystalline cellulose-hyperbranched polyester grafting derivative[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2025, 33: 3064-3075.

[10] Wong S, Shanks R A, Hodzic H. Mechanical behavior and fracture toughness of poly(L-lactic acid)-natural fiber composites modified with hyperbranched polymers[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2004, 289: 447-456.

[11] 刘晶如, 李银成, 丁镜, 等. 聚醚型聚氨酯/超支化聚酯互穿聚合物网络的形态和力学性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(9): 64-68.
Liu J R, Li Y C, Ding J, *et al*. Morphology and mechanical properties of polyurethane/hyperbranched polyester IPN[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2014, 30(9): 64-68.

[12] 黄健, 吴悠, 靳玉娟, 等. Boltorn 型超支化聚酯对 PHBV 的增韧改性研究[J]. 中国塑料, 2020, 34(1): 34-42.
Huang J, Wu Y, Jin Y J, *et al*. Toughening modification of PHBV with Boltorn hyperbranched polyester[J]. China Plastics, 2020, 34(1): 34-42.

[13] 杨锣巾, 丁凯琪, 张馨月, 等. 聚碳酸酯/醋酸纤维素共混超滤膜的制备与性能[J]. 精细化工, 2025, 42(10): 2158-2164.
Yang L J, Ding K Q, Zhang X Y, *et al*. Preparation and properties of polycarbonate/cellulose acetate blend ultrafiltration membranes[J]. Fine Chemicals, 2025, 42(10): 2158-2164.

[14] Jang B N, Wilkie C A. A TGA/FTIR and mass spectral study on the thermal degradation of bisphenol a polycarbonate[J]. Polymer Degradation and Stability, 2004, 86: 419-430.

[15] 朱宗锐. PC/ABS 合金中 PC 含量的测定研究[J]. 价值工程, 2023, 42(4): 86-88.
Zhu Z R. Determination of PC content in PC/ABS alloy[J]. Value Engineering, 2023, 42(4): 86-88.

[16] 黄嘉伟, 韩小龙, 吴悠, 等. 生物基工程聚酯弹性体对聚(3-羟

基丁酸酯-co-3-羟基戊酸酯)的增韧改性研究[J]. 中国塑料, 2022, 36(9): 24-31.
Huang J W, Han X L, Wu Y, *et al*. Toughening modification of poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) by biobased engineering polyester elastomer[J]. China Plastics, 2022, 36(9): 24-31.

[17] Liu T, Nie Y, Chen R, *et al*. Hyperbranched polyether as an all-purpose epoxy modifier: controlled synthesis and toughening mechanisms[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3: 1188-1198.

[18] Fei X M, Wei W, Tang Y Y, *et al*. Simultaneous enhancements in toughness, tensile strength, and thermal properties of epoxy-anhydride thermosets with a carboxyl-terminated hyperbranched polyester[J]. European Polymer Journal, 2017, 90: 431-441.

[19] 许伟坤, 王慧丽, 董亿政, 等. 超支化聚酯在环氧树脂改性中的研究进展[J]. 中国塑料, 2021, 35(1): 110-123.
Xu W K, Wang H L, Dong Y Z, *et al*. Research progress in modification of epoxy resins with hyperbranched polyesters[J]. China Plastics, 2021, 35(1): 110-123.

[20] 黄嘉伟, 韩小龙, 吴悠, 等. EVA 弹性体对 PHBV 的增韧改性研究[J]. 中国塑料, 2022, 36(12): 16-23.
Huang J W, Han X L, Wu Y, *et al*. Toughening modification of PHBV with EVA elastomer[J]. China Plastics, 2022, 36(12): 16-23.

[21] 高挺, 彭强, 马秀清. 聚碳酸酯增韧改性研究进展[J]. 中国塑料, 2025, 39(1): 37-43.
Gao T, Peng Q, Ma X Q. Research progress in modification of polycarbonate[J]. China Plastics, 2025, 39(1): 37-43.

[22] 邢继烨, 薛刚, 张斌, 等. 端氨基超支化聚硅氧烷接枝氧化石墨烯改性环氧胶粘剂的研究[J]. 中国胶粘剂, 2020, 29(6): 7-10.
Xing J Y, Xue G, Zhang B, *et al*. Study on epoxy adhesive modified by amino-terminated hyperbranched polysiloxane grafted graphene oxide[J]. China Adhesives, 2020, 29(6): 7-10.

[23] Wang L P, Liang Y Y, Yu Q, *et al*. Synthesis of epoxy-ended hyperbranched polyesters with reinforcing and toughening function for diglycidyl ether of bisphenol-A[J]. Polymer Composites, 2018, 39: E2046-E2055.

[24] Sun J J, Jin Y J, Wang B, *et al*. High-toughening modification of polylactic acid by long-chain hyperbranched polymers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138: e51295.

[25] Gu W, Liu X, Gao Q, *et al*. Multiple hydrogen bonding enables strong, tough, and recyclable soy protein films[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8: 7680-7689.

Toughening, Strengthening and Plasticizing of Polycarbonate by Boltorn-Type Hyperbranched Polyester

Rui Tie[1], Yida Han[1], Yujuan Jin[1], Suchen Jiang[1,2], Zhaoyong Li[3]

(*1. College of Light Industry Science and Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. Yangzhou Huitong New Material Co., Ltd, Yangzhou 225000, China; 3. Dezhou City Intellectual Property Rights Protection Center, Dezhou 253000, China*)

ABSTRACT: Hydroxy-terminated hyperbranched polyester (HBPE) was synthesized via one-step method by using trimethylolpropane (TMP) as core and 2, 2-dimethylolpropionic acid (DMPA) as monomer. Subsequently, HBPE was added to polycarbonate (PC) as a modifier. The PC/HBPE blends were characterized by Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR), scanning electron microscopy (SEM), differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetric analysis (TGA), universal tensile testing machine, rotational rheometer, and melt flow indexer (MFR). The results indicate that with the addition of HBPE, the glass transition temperature of PC/HBPE blends is decreased from 147.5 ℃ to 130.7 ℃, demonstrating that the flexibility of PC chains is enhanced by the addition of HBPE. When the content of HBPE is 2 phr, a 7.1% increase in fracture strength (to 64.6 MPa) of PC/HBPE blend compared to pure PC is observed; when the HBPE content is 5 phr, increases of 29.4%, 136.8%, and 59.3% in elongation at break, notched impact strength, and tensile toughness of PC/HBPE blend compared to pure PC are seen respectively. Melt flow index testing reveals that when the HBPE content is 5 phr, the melt flow index is increased by 288.4% compared to pure PC, suggesting that the melt viscosity of PC is reduced by the addition of HBPE. Therefore, HBPE is an excellent toughening, strengthening, and plasticizing modifier, with broad application prospects.

Keywords: polycarbonate; terminal hydroxyl type hyperbranched polyester; melt viscosity; toughening