

联苯对二甲醇改性PBAT共聚酯的合成及性能研究

何晓峰^{1,2}, 张爽^{1,2}, 岳琪^{1,2}, 刘啸凤^{1,2}, 于洋^{1,2}, 刘沛含³, 葛铁军^{1,2*}

(1. 沈阳化工大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110142; 2. 辽宁省高分子工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110142;
3. 营口东盛实业有限公司, 辽宁 营口 115000)

摘要: 采用熔融缩聚的方法在聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT)的分子链中引入刚性联苯对二甲醇单体, 制备刚性聚联苯对二甲醇酯/对苯二甲酸-*co*-己二酸丁二酯(PBBAT)。采用傅里叶变换红外光谱仪、液固两用核磁共振仪对共聚酯进行结构表征。利用凝胶渗透色谱仪、X射线衍射仪、差示扫描量热仪、综合热分析仪、接触角测量仪测试等对其分子量及性能进行分析。采用万能电子拉伸试验机和旋转流变仪研究PBBAT共聚物的力学性能。结果表明: PBBAT10的数均分子量可达38 328 g/mol, 结晶度从PBAT的11.57%提升至14.14%, 拉伸强度从PBAT的17.07 MPa提升至26.53 MPa, 弹性模量从PBAT的132.28 MPa提升至210.58 MPa。

关键词: 聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯; 联苯对二甲醇; 熔融缩聚

中图分类号: TQ323.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0111-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.021

Synthesis and Properties Study of 4,4'-bis(hydroxymethyl) Biphenyl Modified PBAT Copolyesters

HE Xiaofeng^{1,2}, ZHANG Shuang^{1,2}, YUE Qi^{1,2}, LIU Xiaofeng^{1,2}, YU Yang^{1,2}, LIU Peihan³, GE Tiejun^{1,2*}

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China;
2. Liaoning Polymer Engineering Technology Research Center, Shenyang 110142, China;
3. Yingkou Dongsheng Industrial Co., Ltd., Yingkou 115000, China)

Abstract: The study employed melt polycondensation to introduce rigid 4,4'-bis(hydroxymethyl) biphenyl monomers into the molecular chains of poly(butylene adipate-*co*-terephthalate) (PBAT), thereby fabricating a rigid poly(biphenol diol-*co*-terephthalate-*co*-adipate) (PBBAT). The copolyester's structure was characterized using Fourier-transform infrared spectroscopy and liquid-solid nuclear magnetic resonance spectroscopy. Gel permeation chromatography, X-ray diffraction, differential scanning calorimetry, thermogravimetric analysis, and contact angle measurements were utilized to analyze the molecular weight and properties of the copolyester. The mechanical properties of the PBBAT copolymer were investigated using a universal electronic tensile testing machine and a rotational rheometer. The results indicated that the number-average molecular weight of PBBAT10 reached 38 328 g/mol. The crystallinity increased from 11.57% of PBAT to 14.14%. The tensile strength improved from 17.07 MPa of PBAT to 26.53 MPa, and the Young's modulus increased from 132.28 MPa of PBAT to 210.58 MPa.

Keywords: PBAT; 4,4'-bis(hydroxymethyl) biphenyl; Melt polycondensation

生物可降解高分子塑料可被自然界中的微生物(如细菌^[1]、霉菌^[2]和藻类^[3]等)降解或分解^[4-7], 最终转化为CO₂、甲烷、水以及一些矿化无机盐^[8-10]。聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT)是一种具有良好抗冲击性、柔韧性和热稳定性的生物可降解聚合物^[11-13], 适用于加工农用、包装等薄

膜产品^[14-15], 被认为是当代绿色材料制造中最具商业潜力、最有前途和最受欢迎的可持续材料之一。然而, PBAT中无定形区比例高、结晶度偏低^[16-18], 导致其在热性能、阻隔性能、力学性能及生产成本等方面存在不足, 限制其广泛应用^[19]。薄型化虽是降低PBAT薄膜成本的有效途径, 但

收稿日期 Submitted date 2025-03-31; 修回日期 Revised date 2025-05-05; 录用日期 Accepted date 2025-06-10

基金项目: 营口市“揭榜挂帅”关键技术攻关项目(2023JH3/0200008)

*联系人, getiejun@163.com

引用本文: 何晓峰, 张爽, 岳琪, 等. 联苯对二甲醇改性PBAT共聚酯的合成及性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 111-116.

Citation: HE X F, ZHANG S, YUE Q, et al. Synthesis and properties study of 4,4'-bis(hydroxymethyl) biphenyl modified PBAT copolyesters [J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 111-116.

会削弱薄膜的力学性能^[20]。因此,对PBAT进行增强增韧是拓宽其应用范围的关键因素之一。本研究通过化学共聚的方法在PBAT聚合物链中引入刚性链段联苯对二甲醇,制备新型共聚酯聚联苯对二甲醇酯/对苯二甲酸-co-己二酸丁二酯(PBBAT),研究联苯对二甲醇含量对共聚酯黏均分子量、热性能、力学性能及亲水性等性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原料

己二酸(AA)、对苯二甲酸(PTA)、1,4-丁二醇(BDO)、联苯对二甲醇(BDM)、辛酸亚锡[Sn(Oct)₂]、钛酸四丁酯(TBT),分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;磷酸三苯酯,分析纯,上海麦克林生化科技有限公司。

1.2 仪器与设备

注塑机,WZS10D,上海新硕精密机械有限公司;核磁

共振波谱仪(NMR),500 MHz,德国布鲁克公司;傅里叶变换红外光谱仪(FTIR),Nicolet iS10,赛默飞世尔科技公司;凝胶渗透色谱仪(GPC),GPC1515,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;热重分析仪(TG),DTG60H,日本岛津公司;X射线衍射仪(XRD),TD300,丹东通达科技有限公司;维卡软化点试验机,RHWK-300,江苏维科特仪器仪表有限公司;旋转流变仪,DHR-2,美国TA公司;综合热分析仪,STA449C,德国耐驰公司;差示扫描量热仪(DSC),Q-200,美国TA公司;万能电子试验机,AI-7000-SU1,高铁检测仪器(东莞)有限公司;接触角测量仪,JC2000CS,上海中晨数字技术设备有限公司。

1.3 PBBAT 共聚酯的制备

图1为PBBAT共聚酯合成步骤,表1为PBBAT共聚酯单体的配方。

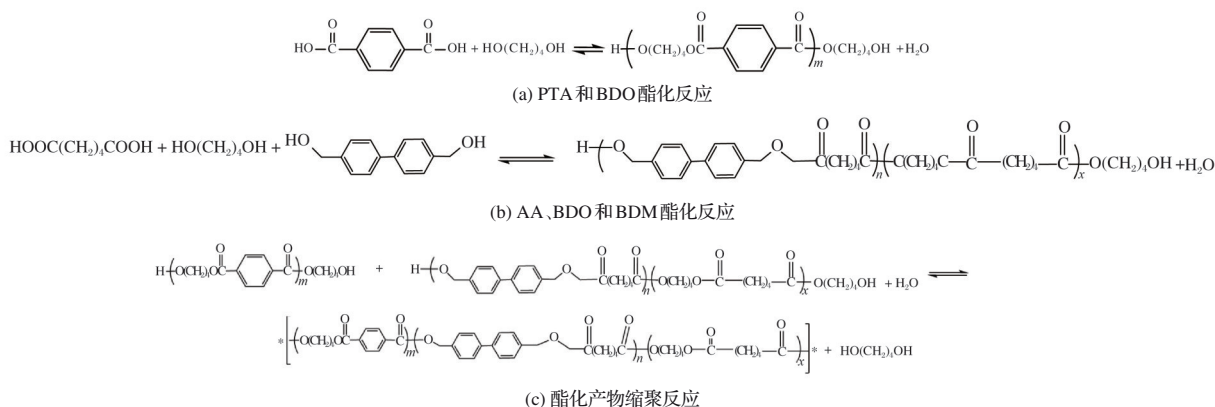


图1 PBBAT 共聚酯合成步骤

Fig.1 Synthesis steps of PBBAT copolyester

表1 PBBAT 共聚酯单体的配方

Tab.1 Formula of PBBAT copolyester monomer 单位: mol

样品	<i>n</i> _{BDM}	<i>n</i> _{BDO}	<i>n</i> _{BDM}	<i>n</i> _{BDO}	<i>n</i> _{PTA}	<i>n</i> _{AA}
PBBAT5.0	5.0	95.0	0.02	0.38	0.2	0.2
PBBAT7.5	7.5	92.5	0.03	0.37	0.2	0.2
PBBAT10.0	10.0	90.0	0.04	0.36	0.2	0.2
PBBAT12.5	12.5	87.5	0.05	0.35	0.2	0.2
PBBAT15.0	15.0	85.0	0.06	0.34	0.2	0.2

按照表1所示的物料配比进行投料,具体实验过程如下:在第一组反应中,将PTA与BDO置于三口烧瓶中,在200 °C条件下进行酯化反应;同步进行第二组反应,将AA、BDO和BDM在180 °C下于另一反应器中反应。两个反应体系中二元酸的用量均为0.2 mol,且保持酸醇物质的量之比为1:2,并添加TBT作为催化剂,其用量为两种二元酸质量总和的0.75%。整个酯化过程在氮气保护下持续反应10 h以确保反应完全。待酯化反应完成后,将两个反应体系的产物充分混合,随后加入Sn(Oct)₂作为缩聚催化剂和磷酸三苯酯作为热稳定剂,二者的添加量均为二元酸总质量的0.75%。缩聚过程在250 °C的氮气环境中抽真空继续反应,当观察到体系黏度显著增加并出现特征性的爬杆现象时,判定反应终点,最终获得目标产物PBBAT共聚酯。

1.4 性能测试与表征

FTIR测试:按照GB/T 6040—2019进行测试,用溴化钾和样品粉末混合并干燥,然后压片制备样片,测试范围4 000~500 cm⁻¹。

¹H-NMR测试:取15 mg样品,常温下以氘代氯仿(CDCl₃)为溶剂,四甲基硅烷为内标,溶解4 h。

GPC测试:流动相为四氢呋喃,采用单分散聚苯乙烯为参比。将提纯后的聚酯溶解于色谱纯的四氢呋喃,样品质量浓度0.1 g/L,测试流速1.0 mL/min。

热性能测试:氮气气氛,升温速率10 °C/min,升温范围40~800 °C。

XRD测试:测试电压40 kV,电流40 mA,扫描速率4 (°)/min,扫描范围5°~60°。

DSC测试:按照GB/T 19466.3—2004进行测试,样品在N₂保护下以10 °C/min速率升温至200 °C,保温2 min以消除热历史,然后以10 °C/min速率降温至-50 °C,停留2 min,再以10 °C/min速率升温至200 °C进行测试。

力学性能测试:按照GB/T 1040.1—2018进行测试,将PBAT及其复合材料切粒,使用注塑机制成长100 mm、宽5 mm、厚2 mm的哑铃状样条,夹距为25 mm,测试速度为50 mm/min,测试温度为室温,每组5个试样,结果取平均值。

流变性能测试:采用平行板($\phi=20$ mm)方式,测试间隙设定在1 mm,试样尺寸是直径20 mm、厚4 mm的圆片。频率扫描温度180 °C,频率0.1~100.0 rad/s,应变固定1%,所有测试均在N₂保护下进行。

维卡软化点测试:按照GB/T 1633—2000进行测试,使用10 N力,以120 °C/h的升温速率进行测试。

水接触角测试:按照GB/T 30693—2014,测试材料表面疏水性。

2 结果与讨论

2.1 共聚酯FTIR分析

图2为PBAT和PBBAT的FTIR谱图。从图2可以看出,2 949 cm⁻¹处为C—H键不对称伸缩振动峰;1 712 cm⁻¹处为C=O收缩振动峰;1 500 cm⁻¹处为苯环骨架的伸缩振动吸收峰;1 462 cm⁻¹处为C—H键反对称弯曲振动峰;1 104 cm⁻¹处为苯环的面内弯曲振动吸收峰;934 cm⁻¹处为C—O对称伸缩振动峰;729 cm⁻¹处为苯环的特征峰。上述吸收峰在PBAT中均有体现,但引入的BDM中含有苯环,制得的PBBAT中苯环数量大于PBAT,故苯环红外吸收峰要高于PBAT中苯环吸收峰,在谱图中也可观察到,说明改性剂BDM成功引入PBAT中。

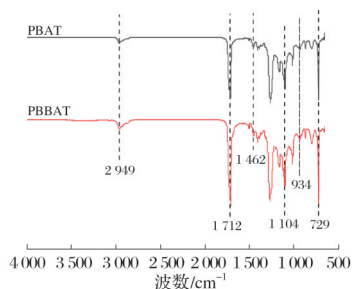
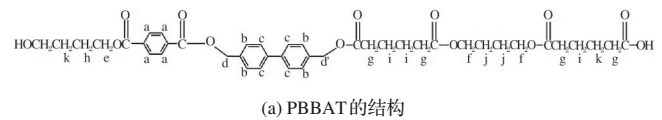


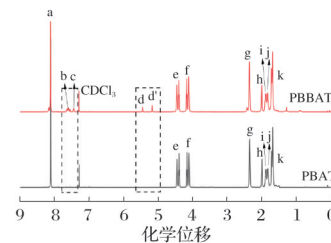
图2 PBAT和PBBAT的FTIR谱图
Fig.2 FTIR spectra of PBAT and PBBAT

2.2 共聚酯核磁共振氢谱分析

图3为PBBAT的结构和PBAT、PBBAT的¹H-NMR谱图。从图3可以看出,PBAT与PBBAT的¹H-NMR谱图的区别在于b、c与d处,7.65处为BDM的苯环中b处H原子的化学位移,7.45处为BDM的苯环中c处H原子的化学位移,5.20~5.40处为BDM的苯环中d与d'处H原子的化学位移。8.10处对应苯环上a处H原子的化学位移;4.40~4.30处的峰对应分子链段与PTA相连的BDO靠近酯基的亚甲基e处H原子的化学位移;4.10处对应BDM改性后的PBA链段中f处的亚甲基H原子的化学位移;2.30处对应BDM改性后的PBA链段中靠近酯基的亚甲基g处H原子的化学位移;2.00处对应PBT链段中h处H原子的化学位移;1.88处对应PBA链段中i处的H原子化学位移;1.82处对应PBA链段中j处的H原子化学位移;1.68处对应链段中k处亚甲基H原子的化学位移。以上结果表明,改性剂BDM接入PBAT链段,成功制备出PBBAT。



(a) PBBAT的结构



(b) PBAT、PBBAT的¹H-NMR谱图

图3 PBBAT的结构和PBAT、PBBAT的¹H-NMR谱图
Fig.3 Structure of PBAT and ¹H-NMR spectra of PBAT and PBBAT

2.3 共聚酯GPC分析

市售PBAT的分子量为 2.44×10^4 g/mol,分子量分布为3.60。表2为PBBAT共聚酯相对分子质量及其分布。从表2可以看出,随着BDM单体用量的逐步增加,PBBAT的数均分子量(M_n)和重均分子量(M_w)均表现出先上升后下降的趋势。在低投料比条件下,由于分子链段的嵌段共聚能力较弱,导致产物呈现较高的无规共聚特征,这是初期分子量较低的主要原因。随着BDM含量的提升,聚合物分子链的序列规整性明显改善,分子链的堆砌密度提高,从而促进了分子量的增长。然而,当BDM的用量超过一定量之后,由于BDM具有刚性苯环结构空间位阻较大,导致PBBAT的相对分子质量下降。

表2 PBBAT共聚酯相对分子质量及其分布

Tab.2 Relative molecular mass and distribution of PBBAT copolyester

样品	M_n /(g·mol ⁻¹)	M_w /(g·mol ⁻¹)	分子量分布
PBBAT5.0	27 539	56 283	2.39
PBBAT7.5	31 874	64 885	2.48
PBBAT10.0	38 328	74 957	2.42
PBBAT12.5	35 032	69 826	2.39
PBBAT15.0	28 627	59 845	2.44

2.4 共聚酯热性能分析

图4为PBBAT的TG和DTG曲线,表3为PBBAT共聚酯的TG数据。从图4和表3可以看出,当BDM摩尔分数为7.5%时,材料表现出最优的热稳定性,其初始分解温度($t_{d,5\%}$)较纯PBAT提高较多,这主要归因于联苯结构的刚性骨架和 π - π 堆积效应增强了分子链间作用力。所有改性样品的最大分解温度($t_{d,max}$)与纯PBAT相比变化不明显,表明BDM主要影响材料的初始分解阶段,而对主链断裂机制影响有限。残炭率分析显示,BDM摩尔分数为10.0%时残炭率最高,这可能是由于适量BDM促进了交联炭层的形成。然而,当BDM摩尔分数超过7.5%后, $t_{d,5\%}$ 呈现下降趋势,这可能是由于过量的BDM会导致相分离,分子链规整性被破坏。综合热稳定性指标,7.5%的BDM添加摩尔分

数在显著提升初始分解温度的同时保持了较好的残炭性能,是改善PBBAT热性能的最佳添加比例^[21]。

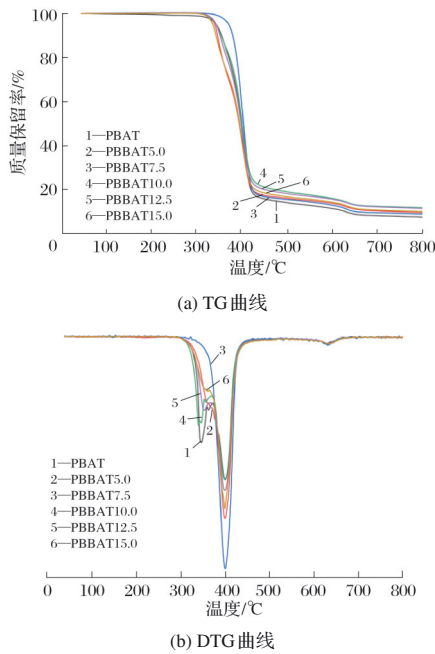


图4 PBBAT的TG和DTG曲线
Fig.4 TG and DTG curves of PBBAT

表3 PBBAT共聚酯的TG数据

Tab.3 TG data of PBBAT copolyester

样品	$t_{d,5\%}/^{\circ}\text{C}$	$t_{d,max}/^{\circ}\text{C}$	残炭率(800 $^{\circ}\text{C}$)/%
PBAT	329.3	402.6	9.03
PBBAT5.0	329.5	403.1	10.32
PBBAT7.5	354.4	401.2	9.10
PBBAT10.0	322.3	402.8	11.96
PBBAT12.5	327.1	401.9	11.52
PBBAT15.0	323.4	402.7	10.28

2.5 共聚酯结晶性能分析

采用XRD测试PBAT和PBBAT的晶体组分状况。图5为PBAT和PBBAT的XRD谱图。从图5可以看出, PBAT和PBBAT复合材料拥有5个特征衍射峰,分别是 16.1° 、 17.5° 、 20.3° 、 23.1° 和 24.9° ,分别对应(011)、(010)、(110)、(100)和(111)晶面上的衍射。PBBAT在XRD谱图与PBAT相似,这进一步说明BDM的加入对PBAT基体材料不会产生负面影响。无论BDM的加入增加与否,均没有发现新的衍射峰,不会对PBAT晶体产生明显修饰,也不会促进新的晶体出现,表明BDM没有改变其晶体结构。

图6为PBAT和PBBAT的DSC曲线,表4为PBAT和PBBAT的DSC数据。从图6和表4可以看出,当BDM摩尔分数在5.0%~10.0%时,共聚酯的结晶度、结晶温度及熔点较纯PBAT相比均有所提升。这种增强效应主要归因于BDM分子中联苯结构的异相成核作用及其端羟基的氢键协同效应,二者共同促进了分子链的有序排列。然而,当BDM摩尔分数超过10.0%后,共聚酯的结晶温度及熔点较

纯PBAT相比均呈现下降趋势,结晶度较之前也有所降低。这是因为随着BDM用量的增加,分子链的柔性和运动能力受到显著限制。当BDM摩尔分数达到15%时,共聚酯的熔点显著降低至 88.4°C 。这说明在低摩尔分数(5%~10%)时, BDM可以适度提高分子链的规整度,但当BDM含量继续增加时,其空间位阻效应占主导地位,导致分子链段难以有序排列,从而降低了结晶能力和熔点。这一现象与BDM部分取代BDO的结构特点密切相关,其饱和态的大体积结构显著影响了整个分子链的构象和堆砌行为。

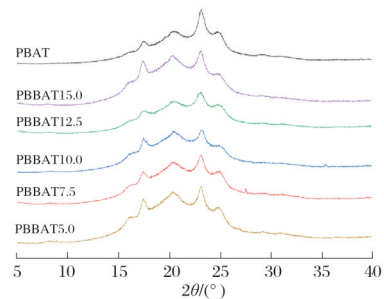
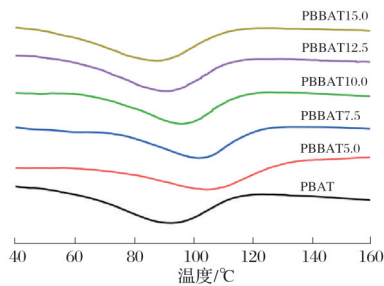
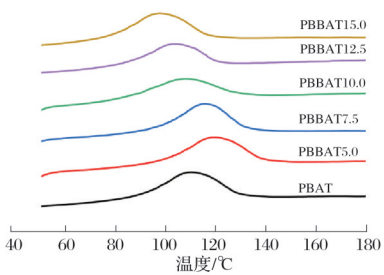


图5 PBAT和PBBAT的XRD谱图
Fig.5 XRD patterns of PBAT and PBBAT



(a) 结晶曲线



(b) 熔融曲线

图6 PBAT和PBBAT的DSC曲线
Fig.6 DSC curves of PBAT and PBBAT

2.6 共聚酯力学性能分析

市售PBAT的拉伸强度为17.7 MPa,断裂伸长率为584%,弹性模量为132.28 MPa。图7为PBAT和PBBAT的力学性能。表5为PBAT和PBBAT的力学性能参数。从图7和表5可以看出,随着BDM摩尔分数从5%增加至10.0%时,PBBAT的拉伸强度逐渐增大,达到26.53 MPa,弹性模量从132.28 MPa提升至210.58 MPa。其增强机制归因于BDM的刚性和结晶度以及分子量的提高,分子量的提高增加分子链间的链缠结,从而提升横向和纵向方面分子链之间的联系^[22-23]。链缠结抑制了分子链之间的相

对滑动,从而提高拉伸强度。而结晶度的增加使塑料分子排列得更加有序,内部应力的分布更加均匀,从而在外力作用下更容易产生整体性的形变,表现出更加优异的力学性能^[24]。但BDM用量继续增加时,其分子链段规整度逐渐下降,结晶度下降,拉伸强度下降,弹性模量下降,断裂伸长率呈现先降低后升高的趋势。这是由于当BDM用量较小时,刚性基团不足以抵抗柔性链段的影响,断裂伸长率较高;随着BDM用量的增加,刚性增强,共聚酯分子链柔性下降,因此断裂伸长率降低。

表4 PBAT和PBBAT的DSC数据

Tab.4 DSC data of PBAT and PBBAT

样品	结晶温度/ °C	熔点/ °C	熔融焓/ (J·g ⁻¹)	结晶焓/ (J·g ⁻¹)	结晶度/ %
PBAT	92.5	110.0	13.19	13.33	11.57
PBBAT5.0	105.6	120.7	15.53	16.93	13.56
PBBAT7.5	101.5	117.5	16.07	14.01	13.98
PBBAT10.0	97.4	112.9	16.68	13.56	14.14
PBBAT12.5	92.3	105.6	15.70	13.21	14.02
PBBAT15.0	88.4	98.3	15.03	12.97	13.89

2.7 共聚酯流变性能分析

图8为PBAT和PBBAT的动态流变学特性。从图8a可以看出,PBBAT存在明显的剪切变稀行为,剪切变稀能够降低加工成本,因为熔体黏度随着剪切速率的增加而降低。而PBBAT复合材料的复数黏度随着BDM用量的增加先升高后降低,但均高于纯PBAT。这是由于BDM的加入,改变了PBAT的链段结构及链段运动,从而提高了PBBAT的黏度。从图8b可以看出,随着BDM用量增加,储存模量也在增加。产生这种情况的主要原因是:BDM为刚性基体,分子刚性提高,分子链的运动受到了限制,使材料的储存模量增加^[25-26]。从图8c可以看出,PBBAT复合材

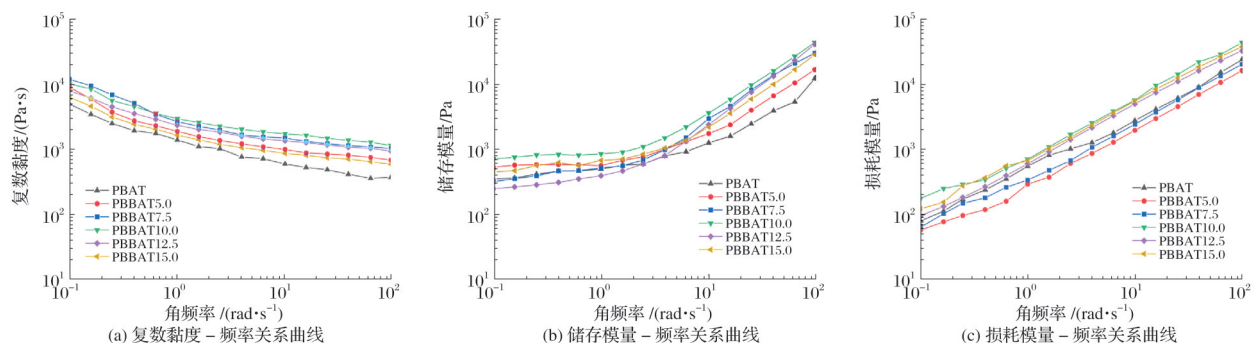


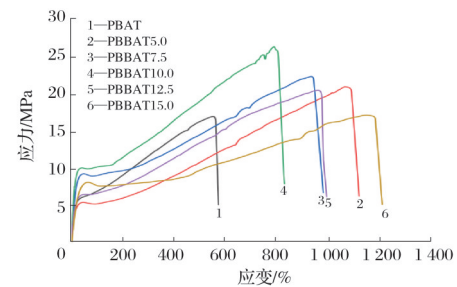
图8 PBAT和PBBAT的动态流变学特性

Fig.8 Dynamic rheological properties of PBAT and PBBAT

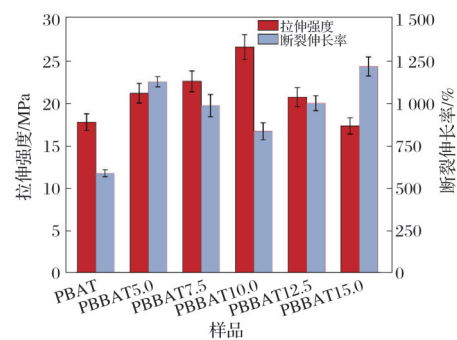
2.8 共聚酯维卡软化点分析

图9为PBAT和PBBAT的维卡软化温度。从图9可以看出,当BDM用量从初始值逐步增加时,维卡软化温度呈现先升后降的非线性变化趋势,从初始114.2 °C上升至峰值128.4 °C,随后回落至115.4 °C。这种变化规律与材料结晶行为密切相关,适量引入联苯结构可提高分子链的规整

料的损耗模量随着BDM用量的增加先降低后升高,说明改性后的PBBAT链段运动困难,从而使材料的模量增加。



(a) 应力-应变曲线



(b) 拉伸强度和断裂伸长率

图7 PBAT和PBBAT的力学性能

Fig.7 Mechanical properties of PBAT and PBBAT

表5 PBAT和PBBAT的力学性能参数

Tab.5 Mechanical properties parameters of PBAT and PBBAT

样品	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	弹性模量/MPa
PBAT	17.07	584.21	132.28
PBBAT5.0	21.09	1122.70	137.41
PBBAT7.5	22.49	982.30	166.73
PBBAT10.0	26.53	831.41	210.58
PBBAT12.5	20.63	996.25	153.61
PBBAT15.0	17.25	1212.64	101.49

性,从而增强分子间作用力,使材料热变形抗力明显提高。然而当过量的刚性单元被引入时,分子链的堆砌有序性遭到破坏,导致热稳定性相应下降,维卡软化温度降低。

2.9 共聚酯水接触角分析

表6为PBAT和PBBAT的水接触角。从表6可以看出,所有测试样品均表现出明显的亲水性(接触角小于

90°)。特别是相较于PBAT,引入BDM改性的PBBAT共聚酯的水接触角更小,且随改性剂用量的增加呈现规律性递减。这种变化主要是由于随着刚性联苯结构含量的提升,分子链段的运动能力受到显著限制,导致聚合物链增长受阻,使体系中保留更多未反应的极性端基。这些亲水性官能团的相对含量增加,有效改善了材料亲水性,从而表现出接触角持续降低的现象。

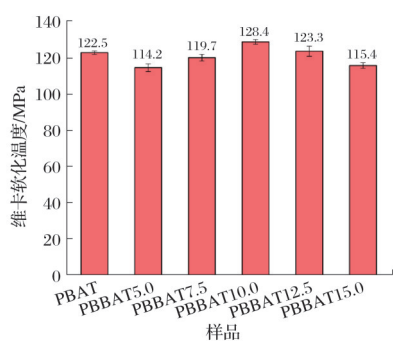


图9 PBAT和PBBAT的维卡软化温度

Fig.9 Vicat softening temperature of PBAT and PBBAT

表6 PBAT和PBBAT的水接触角

Tab.6 Water contact angle of PBAT and PBBAT 单位:(°)

样品	水接触角				
	0 s	60 s	120 s	180 s	240 s
PBAT	89	86	84	82	80
PBBAT5.0	79	74	73	70	68
PBBAT7.5	76	71	70	68	64
PBBAT10.0	68	63	61	60	55
PBBAT12.5	63	61	60	57	53
PBBAT15.0	57	55	52	48	44

3 结论

通过熔融缩聚法在PBAT的分子链中引入刚性BDM单体,成功制备PBBAT共聚酯,并对其结构和组成进行分析。凝胶渗透色谱分析显示PBBAT10的 M_n 为38 328 g/mol。BDM单体的引入提高了共聚酯的热稳定性,在共聚酯的晶体结构没有改变的同时提高了结晶度。与PBAT相比,PBBAT具有更好的力学性能。当BDM摩尔分数为10.0%时,PBBAT的拉伸强度为26.53 MPa,断裂伸长率为831.41%,弹性模量为210.58 MPa。PBBAT的流变行为显示共聚酯具有很好的加工性能。

参考文献

- [1] 孙营,贾雪,裴放,等.可降解高分子材料的研究和应用进展[J].纤维复合材料,2024,41(2):108-111.
- [2] 邵琬滢.可降解生物医用高分子材料的应用研究[J].当代化工研究,2024(16):116-118.
- [3] YAO X, YANG X, LU Y S, et al. Review of the synthesis and degradation mechanisms of some biodegradable polymers in natural environments[J]. Polymers, 2025, 17(1): 66.
- [4] 冯杰,李上,胡佳燕,等.PBAT与天然高分子共混的研究进展[J].浙江工业大学学报,2024,23(4):387-399.
- [5] SHERAZ M, SUN X F, SIDDIQUI A, et al. Research advances in natural polymers for environmental remediation[J]. Polymers, 2025, 17(5): 559.
- [6] LIU Y G, JIANG S K, WENG F Q, et al. Study on the structure and properties of PBAT-based biocomposite with high starch content[J]. Starch-Stärke, 2024, 77(2): 2300214.
- [7] 张涛,钟永红,聂绍丽,等.可生物降解材料材质分析研究进展[J].塑料科技,2023,51(11):99-104.
- [8] YU W W, QIU R, LEI W, et al. Effects of modification on properties of wood flour/PBAT biocomposites[J]. Polymers, 2025, 17(5): 555.
- [9] 连雨欣,郑莹莹,孙晓丽.可生物降解塑料的改性研究进展[J].当代化工研究,2024(18):8-10.
- [10] 刘洋,王婷,蔡庆,等.可降解聚己二酸对苯二甲酸丁二醇酯/天然橡胶生物基复合材料性能的研究[J].橡胶工业,2024,71(12):919-924.
- [11] 张圣贺.聚对苯二甲酸己二酸丁二醇酯阻燃改性与多尺度协同增效机制研究[D].合肥:中国科学技术大学,2025.
- [12] SHU Y, HE J, XU D P, et al. Mechanical and thermal behavior of PBAT matrix composites filled with lignin[J]. Journal of Polymer Research, 2025, 32(2): 1-10.
- [13] 何晓峰,聂光志,郭福强,等.PBAT增强改性的研究进展[J].塑料科技,2024,52(3):111-115.
- [14] XUE Y H, TANG K, LIAO X Y. Preparation of modified cellulose/PBAT films and its application in food preservation[J]. Reactive and Functional Polymers, 2024, 205: 106097.
- [15] 雷时雨,宋景新,李帅.PLA/PBAT复合膜制备技术及其在食品包装中的应用前景[J].食品工业科技,2024,45(6):372-379.
- [16] MAHATA D, SANGEETHA K, RAHUL G, et al. Poly(butylene adipate-co-terephthalate) polyester synthesis process and product development[J]. Polymer Science, Series C, 2021, 63(1): 102-111.
- [17] 喻咏,滕明才,程前,等.聚对苯二甲酸-己二酸丁二醇酯/聚乳酸可降解复合材料的制备及其性能研究[J].化学推进剂与高分子材料,2024,22(4):56-60.
- [18] 杨帆,吴宏,马双翼,等.PBAT及其改性复合材料的研究进展与应用[J].广东化工,2024,51(21):17-19,76.
- [19] ZHOU C, CHEN K, ZHANG Z, et al. Enhanced crystallization of poly(butylene adipate-co-terephthalate) by a self-assembly nucleating agent[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2024, 42(5): 663-674.
- [20] PIETROSANTO A, SCARFATO P, DI MAIO L, et al. Development of eco-sustainable PBAT-based blown films and performance analysis for food packaging applications[J]. Materials, 2020, 13(23): 5395.
- [21] 王泽澎.PBAT/热塑性淀粉共混物的改性研究[D].长春:长春工业大学,2024.
- [22] LIU Y Y, DOU Q. Enhanced toughness of poly(lactic acid) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends by incorporating an ADR chain-extending agent and a bio-resourced plasticizer[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 293: 139344.
- [23] LIU Y M, ZHOU J, YANG H Y, et al. Isosorbide as a building block for poly(butylene adipate-co-terephthalate)-based copolyesters with enhanced mechanical properties and tunable biodegradability[J]. Polymer Degradation and Stability, 2024, 229: 111005.
- [24] JUBINVILLE D, SHARIFI J, FAYAZFAR H, et al. Hemp hurd filled PLA-PBAT blend biocomposites compatible with additive manufacturing processes: Fabrication, rheology, and material property investigations[J]. Polymer Composites, 2023, 44(12): 8946-8961.
- [25] 卢波,季君晖,吴毓炜,等.生物基单体异山梨醇改性生物降解树脂PBAT研究[J].聚酯工业,2025,38(2):21-24.
- [26] WANG J R, XU M Y, YAN J, et al. Biodegradable poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) modified by 1,4-cyclohexanedimethanol[J]. Polymer, 2024, 308: 127348.