

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.07.009

双叔丁基过氧异丙基苯对低分子量聚丁二酸丁二酯的扩链改性

张震, 陈怡杰, 姜莱, 赵世成

(华东理工大学化工学院, 上海市多相结构材料化学工程重点实验室, 上海 200237)

摘要: 为探究双叔丁基过氧异丙基苯(BIPB)对低分子量聚丁二酸丁二酯(PBS)的扩链效果,提升其综合性能,通过密炼工艺成功制备了扩链PBS材料。系统研究了BIPB添加量对PBS材料熔体流动速率(MFR)、流变行为、结晶熔融行为、特性黏数、黏均分子量以及力学性能的影响,并进一步分析了扩链剂对聚合物分子链结构重构及材料性能优化的作用规律。结果表明,随着BIPB添加量的增加,扩链PBS的MFR逐渐降低,当BIPB质量分数为0.08%时,扩链PBS的MFR降低至4.4 g/10 min。流变分析显示,改性后PBS的储能模量和损耗模量均显著提升,表明熔体弹性和黏性特征得到协同增强。差示扫描量热分析表明,扩链PBS的结晶温度由62 °C提高至91 °C,增幅达29 °C,同时结晶速率加快,证实分子链结构改变对结晶行为具有决定性影响。改性后PBS的特性黏数从1.24 dL/g提升至2.15 dL/g,黏均分子量从78 910 g/mol增至158 620 g/mol。力学性能测试显示,扩链PBS的缺口冲击强度达到了10.5 kJ/m²,拉伸强度达到了56.1 MPa,弯曲模量达到了1 106.2 MPa,比未改性样品分别提升41.9%,10.7%和47.2%,表明扩链有效改善了PBS的综合力学性能。扩链改性后的PBS在保持良好加工性能的同时,力学强度和热性能得到显著提升,展现出广阔的应用前景。

关键词: 聚丁二酸丁二酯;扩链改性;双叔丁基过氧异丙基苯;熔体流动速率;结晶

中图分类号: TQ325.1+4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)07-0056-07

Chain extension modification of low molecular weight poly(butylene succinate) using 1,3-bis(tert-butylperoxyisopropyl) benzene

ZHANG Zhen, CHEN Yijie, JIANG Lai, ZHAO Shicheng

(Shanghai Key Laboratory of Multiphase Materials Chemical Engineering, School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract : To investigate the chain extension efficacy of 1,3-bis(tert-butylperoxyisopropyl)benzene (BIPB) on low molecular weight poly(butylene succinate) (PBS) and enhance its overall performance, chain-extended PBS materials were prepared via internal mixing. The effects of BIPB loading on melt flow rate (MFR), rheological behavior, crystallization and melting behavior, intrinsic viscosity, viscosity-average molecular weight, and mechanical properties were systematically studied. The effects of chain extenders on the reconstruction of polymer molecular chain structure to optimize material properties was further analyzed. Results show that increasing BIPB content leads to the progressive decline in MFR. When the mass fraction of BIPB was 0.08%, the MFR decreased from 25.9 g/10 min to 4.4 g/10 min. Rheological analysis shows that the storage modulus and loss modulus of the modified PBS are significantly improved, indicating that the synergetic enhancements of the melt elasticity and viscosity characteristics are obtained. Differential scanning calorimetry analysis indicates that the crystallization temperature of the extended PBS increases from 62 °C to 91 °C, with an increase of 29 °C. Meanwhile, the crystallization rate accelerates, confirming that the change in molecular chain structure has the decisive influence on the crystallization behavior. The intrinsic viscosity and the viscosity-average molecular weight of modified PBS increases from 1.24 dL/g to 2.15 dL/g and from 78 910 g/mol to 158 620 g/mol, respectively. The

通信作者: 赵世成,教授,主要研究方向为聚烯烃高性能化

收稿日期: 2025-04-12

引用格式: 张震,陈怡杰,姜莱,等.双叔丁基过氧异丙基苯对低分子量聚丁二酸丁二酯的扩链改性[J].工程塑料应用,2025,53(7):56-62.

ZHANG Zhen, CHEN Yijie, JIANG Lai, et al. Chain extension modification of low molecular weight poly(butylene succinate) using 1,3-bis(tert-butylperoxyisopropyl) benzene[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7): 56-62.

mechanical properties tests show that the notched impact strength of the chain-extended PBS reaches 10.5 kJ/m^2 , the tensile strength reaches 56.1 MPa , and the flexural modulus reaches 1106.2 MPa . Which are increased by 41.9%, 10.7% and 47.2%, compared with the unmodified samples respectively, indicating that the chain extension effectively improves the comprehensive mechanical properties of PBS. These findings confirm that BIPB-based chain extension markedly improves the mechanical and thermal properties of PBS while retaining good processability, highlighting its potential for broader application.

Keywords : polybutylene succinate ; chain extension modification ; 1,3-bis(tert-butylperoxyisopropyl)benzene ; melt flow rate ; crystallization

近年来,塑料制品引发的白色污染问题持续加剧,主要原因在于其降解速度缓慢,且降解生成的产物可能对环境造成负面影响。同时,降解过程中,可能释放有害物质,这些物质严重影响了生态环境,甚至对人体健康也造成危害^[1-3]。在此背景下,生物基高分子材料,尤其是生物可降解材料由于在自然条件下可降解为无毒无害的物质逐渐受到研究者的关注,成为解决这一问题的突破口。其中,聚丁二酸丁二酯(PBS)因其独特的线性结构,不仅具备与传统塑料(如聚丙烯、聚乙烯)相媲美的物理性能,还能在自然条件下被降解为无害的物质,从而有效降低环境污染^[4]。然而,PBS在合成过程中需高真空条件,且缩聚后期黏度增大,小分子难以脱除,导致难以获得高分子量的PBS^[5],使得PBS呈现出高熔体流动速率(MFR)的特性,进而限制了其应用性能发挥。

通过添加适当的扩链剂对PBS进行改性,可有效增大其分子量,从而提高其性能表现。此外,PBS分子链柔性较大,适合通过扩链改性提升熔体强度,以满足实际加工需求。然而,目前常用的扩链剂都存在一些难以克服的困难,恶唑啉类成本较高^[6];异氰酸酯类扩链改性后的PBS存在降解产物具有毒性的问题^[5,7];环氧类与端羟基的反应活性相较于端羧基低^[8],需要在高温或添加促进剂的条件下进行。因此有必要寻找一种新型扩链剂。

双叔丁基过氧异丙基苯(BIPB)作为一种过氧化物型扩链剂,具有较高的热分解活性和优良的热稳定性,且气味较小。BIPB在加热条件下可分解产生自由基,进而使PBS分子链发生链增长,从而有效提高体系的分子量与熔体黏弹性能。与传统扩链剂相比,BIPB不仅反应条件相对温和,而且降解过程中不引入潜在有害的小分子副产物,具有较好的环境友好性与应用可行性。

因此,笔者以PBS为基体材料,采用BIPB为扩链剂,系统考察了BIPB添加量对PBS黏均分子量、

结晶行为、力学性能、MFR及流变行为等性能的影响规律,从而为PBS的扩链改性提供理论依据和技术支持。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PBS:分析纯,上海华谊集团中央研究院吴泾分公司;

BIPB:分析纯,上海易恩化学技术有限公司;

苯酚:分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

1,1,2,2-四氯乙烷:化学纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 主要仪器及设备

转矩流变仪:HAAKE PolyLab OS,德国Thermo Fisher公司;

MFR测试仪:MI-4,德国Gottfert公司;

缺口制样机:JJANM21,承德市金建检测仪器有限公司;

电子万能试验机:CMT4204,美特斯工业系统(中国)有限公司;

电子简支梁冲击试验机:XJJD-5,承德市金建检测仪器有限公司;

旋转流变仪:MCR-302,安东帕(上海)商贸有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC 3+,瑞士Mettler Toledo公司。

1.3 试样制备

将PBS在 80°C 下真空干燥4 h,随后取适量PBS颗粒与BIPB置于高速混合机中充分混匀,最后转移至密炼机中在 160°C 以 60 r/min 的转速密炼5 min,产物经切粒和烘干处理。BIPB添加量分别为PBS质量的0%,0.05%,0.06%,0.07%,0.08%,样品分别命名为PBS-0%,PBS-0.05%,PBS-0.06%,PBS-0.07%,PBS-0.08%。

1.4 测试与表征

1.4.1 加工扭矩

使用转矩流变仪研究BIPB添加量对PBS扩链加工的影响。扭矩测试参数为:共混过程中熔体温度控制在160℃,转速60 r/min。

1.4.2 MFR测试

测试前将样品置于80℃烘箱中干燥4h,按照GB/T 3682-2018,设定测试温度为190℃,在载荷为2.16 kg条件下,对PBS及扩链改性的PBS进行MFR测试。

1.4.3 流变行为测试

通过旋转流变仪对PBS样品的流变性能进行测试。测试温度为140℃,间距为1 mm,角频率范围为0.1~100 rad/s。

1.4.4 DSC测试

每组样品切取3~5 mg放入铝坩埚,将其放入DSC中在N₂气氛下进行测试。测试中,样品以10℃/min的速度从25℃升至170℃,为消除热历史,需要恒温5 min,随后以相同的温度变化速率将温度降至25℃,由此获得样品的结晶曲线;再次将样品以10℃/min的速度升温至170℃,获得二次熔融曲线。

1.4.5 特性黏数及黏均分子量测试

取0.125 g样品溶解在25 mL的苯酚/1,1,2,2-四氯乙烷的混合溶液中制备样品溶液,其中,苯酚与1,1,2,2-四氯乙烷质量比为1:1,并充分混匀;然后在25℃水浴条件下使用乌氏黏度计测量样品的特性黏数,计算公式见式(1)~式(3)。

$$\eta_r = \frac{t}{t_0} \quad (1)$$

$$\eta_{sp} = \eta_r - 1 \quad (2)$$

$$[\eta] = \frac{\sqrt{1 + 1.4\eta_{sp}} - 1}{0.7C} \quad (3)$$

式中: η_r 为相对黏度; t_0 为纯溶剂(苯酚/1,1,2,2-四氯乙烷混合溶液)的流出时间; t 为测试中含有样品溶液的流出时间; η_{sp} 为增比黏度; $[\eta]$ 为样品的特性黏数; C 为溶液浓度。

Mark-Houwink 方程给出了聚合物溶液的特性黏数与黏均分子量之间的关系,见式(4),由此根据 $[\eta]$ 可以计算出黏均分子量。

$$[\eta] = KM_\eta^\alpha \quad (4)$$

式中: M_η 为黏均分子量; $K=1.71 \times 10^{-4}$, $\alpha=0.783$ ^[9]。

1.4.6 力学性能

将样品于140℃下注塑得到拉伸、弯曲和冲击试验的试样。冲击性能按照GB/T 1043.1-2008标准进行测试。弯曲性能和拉伸性能分别按照GB/T 9341-2008和GB/T 1040-1BA标准进行测试。

2 结果与讨论

2.1 加工扭矩变化

图1为在不同添加量下的BIPB对PBS进行扩链时扭矩的变化。从图1可以看出随着BIPB添加量的增加,平衡扭矩逐渐升高,这主要归因于随着分解产生的自由基数量增加,提高了反应速率,导致平衡扭矩的上升。未添加BIPB的PBS材料在共混过程中表现出最低的扭矩值,并且随着时间推移呈现持续下降的趋势。这是由于高温作用下PBS逐渐熔融,主链发生热降解,表现为扭矩的持续降低。而经BIPB改性后的PBS材料在一定时间后扭矩曲线出现上升。这是由于BIPB在高温下分解生成的自由基能够通过夺取PBS分子链上的氢原子,促进PBS分子链间的碳原子相互连接,形成支化结构,从而有效抑制PBS的热降解^[10]。

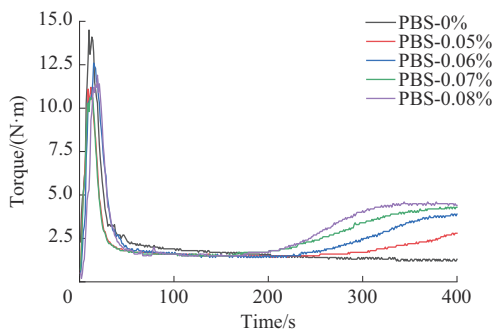


图1 不同添加量下BIPB扩链改性PBS的反应扭矩

Fig. 1 The reaction torque of PBS modified by BIPB chain extension at different concentrations

2.2 MFR变化

研究了不同BIPB添加量对扩链PBS MFR的影响,结果如图2所示。随着BIPB添加量的增加,PBS的MFR逐渐降低,材料熔体流动性的显著减弱。当BIPB添加量为PBS质量的0.06%时,MFR降至6.1 g/10 min,表明少量添加BIPB即可对PBS产生明显的扩链改性效果。BIPB引发的扩链反应不仅延长了分子链长度,同时使得PBS的支化程度增加,提高了分子链之间的缠结作用,使分子链在熔体状态下的移动受到极大限制,从而降低了MFR^[11]。

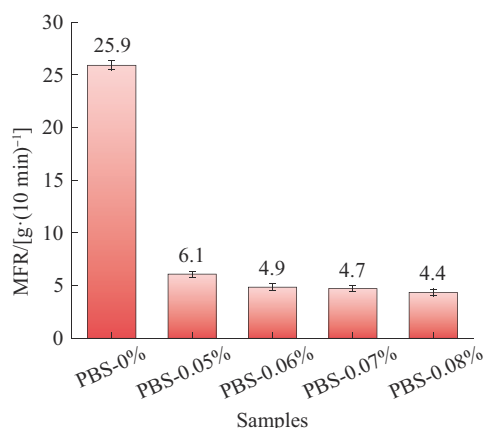


图2 不同添加量下BIPB扩链改性PBS的MFR

Fig. 2 MFR of PBS modified by BIPB chain extension at different concentrations

2.3 流变行为分析

图3展示了不同BIPB添加量对扩链PBS流变性能的影响。由图3a-b可以看出,扩链改性PBS的储能模量(G')和损耗模量(G'')均呈现出随着BIPB添加量的增加而上升的趋势。这可能是因为扩链反应导致PBS分子链的增长,使得分子链之间的缠结程度增加,系统内的摩擦力增强,从而限制了分子链的自由运动。这种变化使得材料的弹性特性和黏性特性都得到了增强^[15]。

由图3c可见,随着角频率的升高,原PBS的损耗因子($\tan\delta$)下降速率明显快于扩链PBS。造成这一现象的主要原因在于,扩链过程使PBS分子链增长,进而增加了分子运动的受限程度,从而使得改性PBS的 $\tan\delta$ 在随角频率增大时下降的速率变慢。随着BIPB添加量的增加, $\tan\delta$ 普遍出现下降趋势。这是因为经过BIPB扩链后,PBS的链缠结程度增大,分子间的相互作用加强,更多的能量被储存在材料的体系内^[16]。

从图3d可以看出,在低频率区域,PBS的复数黏度(η^*)出现了明显的牛顿平台。这是因为在低频条件下,频率较低,分子链缠结结构未被完全破坏,能够得到足够的时间进行重构,因此PBS的 η^* 在这一频率范围内变化较小。而对于扩链改性后的PBS,其 η^* 明显高于未改性的PBS,并且牛顿平台消失^[17]。这一变化可能是由于改性PBS内部形成了长链支化结构,增加了PBS链之间的缠结程度,限制了分子的运动能力,从而使得复数黏度在整个频率范围内显著提高,并且不再出现明显的平台区^[18]。

2.4 结晶熔融行为分析

研究了BIPB添加量对扩链PBS结晶和熔融行

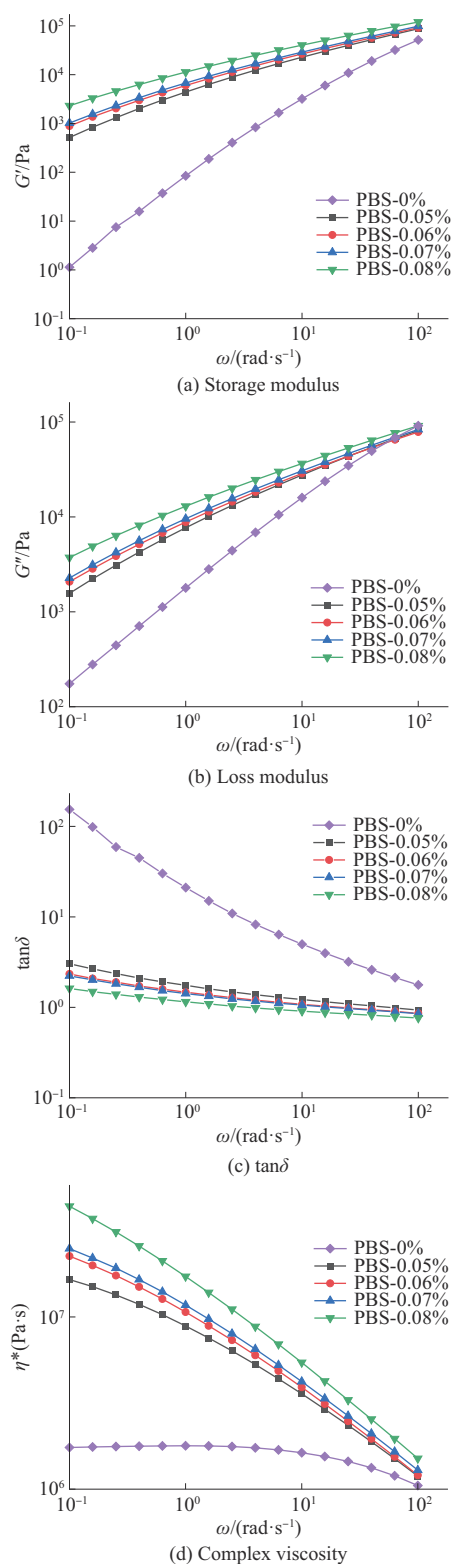


图3 不同添加量下BIPB扩链改性PBS的流变行为曲线

Fig. 3 Rheological behavior curves of PBS modified by BIPB chain extension at different concentrations

为的影响,结果如图4所示。由图可知,未经过扩链处理的PBS结晶温度为62℃,随着BIPB加入量的提高,扩链PBS的结晶温度呈现逐步上升的趋势。

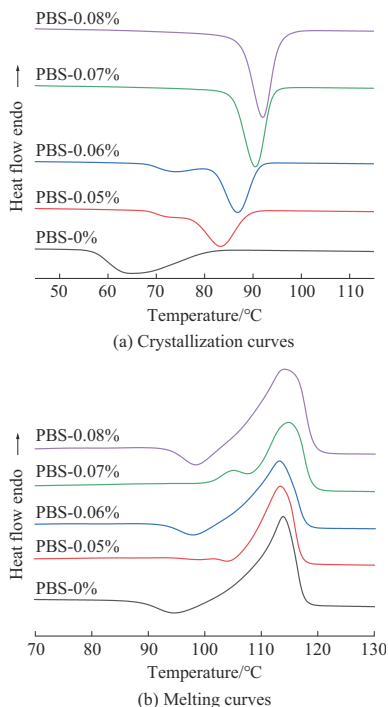


图4 不同添加量下BIPB扩链改性PBS的DSC曲线
Fig 4 DSC curves of PBS modified by BIPB chain extension at different concentrations

当BIPB含量达到0.08%时,结晶温度提升至91℃,表明BIPB改性对PBS结晶行为具有显著影响。

2.5 特性黏数及黏均分子量变化

研究了不同BIPB添加量对扩链PBS特性黏数和黏均分子量的影响,结果如图5所示。数据显示,随着BIPB添加量的增加,PBS材料的特性黏数和黏均分子量均显著提升。当添加量为PBS质量的0.08%时,特性黏数达到2.15 dL/g,黏均分子量从78 910 g/mol增至158 620 g/mol。上述现象可归因于扩链过程中PBS分子链长度的增加以及链间相互作用力的增强。说明添加BIPB能够有效提高PBS的分子量。

2.6 力学性能测试

研究了BIPB添加量对扩链PBS力学性能的影响,结果如图6所示。图6a中,随着BIPB添加量的增加,PBS的拉伸强度和弯曲强度相较于原料均有了显著提高。未添加BIPB的PBS材料拉伸强度为50.7 MPa,而当BIPB添加量为PBS质量的0.08%时,拉伸强度提升至56.1 MPa,相较于未改性材料提高了10.7%。这一现象可归因于BIPB作为扩链剂的作用,在扩链反应中形成的化学交联点显著增强了分子链间的结合力,使材料在拉伸载荷下表现出更高的拉伸强度^[12]。

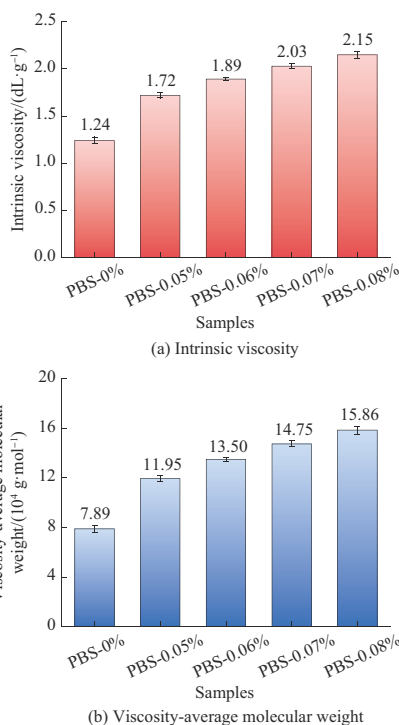


图5 不同添加量下BIPB扩链改性PBS的特性黏数与黏均分子量
Fig 5 Intrinsic viscosity and viscosity-average molecular weight of PBS modified by BIPB chain extension at different concentrations

冲击强度的测试结果如图6b所示,从冲击强度的变化来看,未扩链PBS的冲击强度为7.4 kJ/m²,经过BIPB改性后,冲击强度提高至10.5 kJ/m²,增幅达41.9%。扩链反应通过在PBS分子间引入额外的结合点有效分散了材料在受冲击载荷时的应力。同时,扩链反应提升了熔体强度,使得改性PBS能够吸收更多的能量,从而表现出更高的冲击韧性^[13]。

图6c为弯曲模量的测试结果,可以看出,随着BIPB添加量的增加,扩链PBS的弯曲模量相较于原料有着显著提升,在BIPB添加量为PBS质量的0.08%时,弯曲模量从751.7 MPa提升到了1 106.2 MPa,提升了47.2%。这是由于扩链后PBS的链长变长,使得链与链之间的作用增大,表现出更高的弯曲模量。

此外,图6d显示,BIPB的加入对材料的断裂伸长率产生了负面影响。未改性PBS的断裂伸长率为242.9%,而当BIPB添加量达到0.08%时,断裂伸长率下降至175.9%。这一趋势主要是由于扩链反应增加分子链间的相互作用,限制了分子链的相对滑动,限制柔性链段的运动,降低了材料的延展性^[14]。

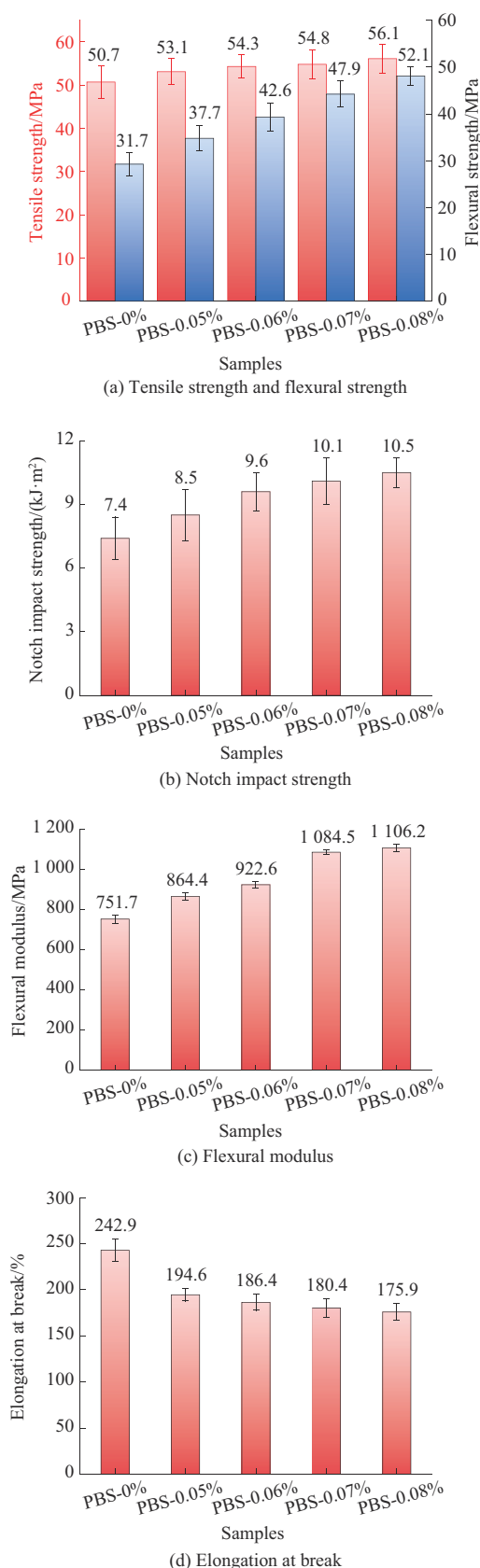


图6 不同添加量下BIPB扩链改性PBS的力学性能

Fig. 6 Mechanical properties of PBS modified by BIPB chain extension at different concentrations

2.7 机理分析

BIPB在熔融共混时,由于热分解可产生叔烷氧自由基(RO·),RO·通过夺取PBS分子链上的氢,形成PBS自由基(PBS·),PBS·之间发生双基终止反应,形成了支化结构,使得分子链增长,其可能的反应机理如图7所示。

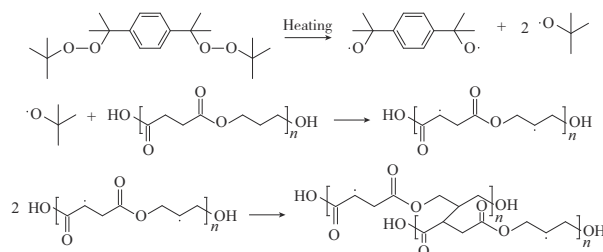


图7 BIPB与PBS的反应机理

Fig. 7 Reaction mechanism of BIPB and PBS

3 结论

(1)通过BIPB的扩链改性,PBS的MFR显著降低,从25.9 g/10 min降至4.4 g/10 min,表明材料熔体流动性大幅减弱。同时,PBS的特性黏数从1.24 dL/g提升至2.15 dL/g,分子量显著增加。这种优化表明扩链反应有效增强了分子链缠结,从而提升了材料的加工适应性和稳定性。并且DSC分析表明,BIPB扩链改性提高了PBS的结晶温度,从62℃升至91℃。

(2)改性后的PBS在拉伸强度、冲击强度和弯曲模量方面均表现出显著提升,分别增加了10.7%,41.9%和47.2%。这种改性效果源于BIPB的扩链反应增强了分子间结合力,提高了材料在外力作用下的抗变形能力。

(3)流变行为分析显示,改性PBS的储能模量和损耗模量均随角频率增加而显著升高,且 $\tan\delta$ 的频率依赖性显现出黏弹性转变。这种行为变化证明BIPB扩链反应通过增强分子链缠结和支化结构,调节了材料的弹性和黏性平衡,进一步提升了其在动态加工条件下的稳定性。

参考文献

- [1] 朱会会,王凡梅,林肖月,等.土壤微塑料污染及生物降解研究进展[J].北方园艺,2022(10):117-123.
ZHU Huihui, WANG Fanmei, LIN Xiaoyue, et al. Research progress on soil microplastic pollution and biodegradation[J]. Northern Horticulture, 2022(10):117-123.
- [2] 李求恩.生物可降解材料研究进展及国内外产业现状分析[J].湖南包装,2021,36(2):31-34.
LI Qiuen. Research progress of biodegradable materials and analysis of domestic and foreign industry status[J]. Hunan Packaging, 2021, 36(2):31-34.

- 2021,36(2):31-34.
- [3] 张丽,王帅.生物基塑料发展热点及技术方向展望[J].化学工业,2024,42(4):20-31.
- ZHANG Li, WANG Shuai. Development hotspots and technical directions outlook of bio-based plastics[J]. Chemical Industry, 2024,42(4):20-31.
- [4] RAFIQAH S A, KHALINA A, HARMAEN A S, et al. A review on properties and application of bio-based poly(butylene succinate)[J]. Polymers, 2021, 13(9). Doi: 10.3390/polym13091436.
- [5] 吕学东,罗发亮,林海涛,等.聚丁二酸丁二醇酯的合成工艺及气体阻隔性最新进展[J].化工进展,2023,42(5):2 546-2 554.
- LYU Xuedong, LUO Faliang, LIN Haitao, et al. Recent progress of synthesis technology and gas barrier research of poly(butylene succinate)[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(5):2 546-2 554.
- [6] 罗立滨,陈溶,孙晓丽,等.废旧涤纶纺织品的回收利用技术[J].再生资源与循环经济,2023,16(10):32-38.
- LUO Libin, CHEN Rong, SUN Xiaoli, et al. Recycling technology of waste polyester textiles[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2023, 16(10):32-38.
- [7] 王美珍,赵恬娇,董亚鹏,等.聚对苯二甲酸乙二醇酯结晶行为改性的研究进展[J].塑料工业,2024,52(7):31-38.
- WANG Meizhen, ZHAO Tianjiao, DONG Yapeng, et al. Research progress on modifications of crystallization behaviors of polyethylene terephthalate[J]. China Plastics Industry, 2024, 52(7):31-38.
- [8] 杨兆平,信春玲,何亚东.环氧基低聚物改性聚对苯二甲酸乙二醇酯的流变性能和发泡性能[J].北京化工大学学报(自然科学版),2017,44(6):50-55.
- YANG Zhaoping, XIN Chunling, HE Yadong. Rheological behavior and foaming properties of polyethylene terephthalate modified with epoxy-based oligomers[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2017, 44(6): 50-55.
- [9] 刘晓辉,黄关葆,汪少朋.高摩尔质量聚丁二酸丁二醇酯的合成及其摩尔质量与特性黏度的关系[J].塑料工业,2008,36(11):14-16.
- LIU Xiaohui, HUANG Guanbao, WANG Shaopeng. Synthesis of high molecule weight poly(butylene succinate) and relationship of molecule weight with intrinsic viscosity[J]. China Plastics Industry, 2008, 36(11):14-16.
- [10] 颜祥禹. PLA 和 PBST 系列共混物的制备及性能研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2022.
- YAN Xiangyu. Preparation and properties of PLA and PBST blends[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2022.
- [11] 刘征,姚远,杨秀秀,等.化学交联改性 PBAT 工艺条件与性能研究[J].安徽化工,2023,49(6):43-46,52.
- LIU Zheng, YAO Yuan, YANG Xiuxiu, et al. Study on the process conditions and properties of chemical cross-linking modified PBAT[J]. Anhui Chemical Industry, 2023, 49(6):43-46, 52.
- [12] 毛清国,李雪,张佰城,等.交联剂对 PPC-P/PBS 和 PPC-P/PBAT 性能的影响[J].工程塑料应用,2024,52(5):146-152.
- MAO Qingguo, LI Xue, ZHANG Baicheng, et al. Effect of cross-linking agent on properties of PPC-P/PBS and PPC-P/PBAT copolymer[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(5):146-152.
- [13] GAIDUKOV S, PLATNIEKS O, GAIDUKOVA G, et al. Understanding the impact of microcrystalline cellulose modification on durability and biodegradation of highly loaded biocomposites for woody like materials applications[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2022, 30(4):1 435-1 450.
- [14] 黄芸珂,汪艳.形状记忆交联聚乙烯的制备及其光热、磁响应性能[J].高分子通报,2024(12):1 814-1 820.
- HUANG Yunke, WANG Yan. Preparation of shape memory cross-linked polyethylene and its photothermal and magnetic response properties[J]. Polymer Bulletin, 2024(12):1 814-1 820.
- [15] LI G, QI R R, LU J Q, et al. Rheological properties and foam preparation of biodegradable poly(butylene succinate)[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 127(5):3 586-3 594.
- [16] 孙小杰,任月庆,陈兰兰.交联高密度聚乙烯结构与性能研究[J].塑料科技,2024,52(7):23-27.
- SUN Xiaojie, REN Yueqing, CHEN Lanlan. Study on structure and properties of crosslinked high density polyethylene[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(7):23-27.
- [17] DONG W F, MA P M, WANG S F, et al. Effect of partial cross-linking on morphology and properties of the poly(β -hydroxybutyrate)/poly(d, l-lactic acid) blends[J]. Polymer Degradation and Stability, 2013, 98(9):1 549-1 555.
- [18] 张佰城,郑雨欣,许珂,等. PLA/PBAT 复合材料增容增塑的研究进展[J].工程塑料应用,2023,51(12):165-169.
- ZHANG Baicheng, ZHENG Yuxin, XU Ke, et al. Research progress on compatibilization and plasticization of PLA/PBAT composites[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(12):165-169.