

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.07.008

SEBS分子结构及配方组成对改性聚丙烯刚韧平衡性能的影响

赖昂^{1,2}, 陈胜杰¹, 任思华¹, 付伟¹, 陈瑶¹, 朱翔宇², 彭庆益³

(1. 武汉金发科技有限公司, 武汉 430109; 2. 金发科技股份有限公司, 广州 510663; 3. 上汽大众汽车有限公司, 上海 201805)

摘要: 采用熔融共混法制备聚丙烯(PP)基复合材料,通过调控苯乙烯-乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SEBS)的分子结构参数(苯乙烯含量、丁二烯段1,2-聚合比例)及熔体流动速率(MFR),结合力学性能测试与微观形貌分析,探究了SEBS分子结构对PP复合材料刚韧平衡性能的影响机制。对比研究了SEBS与乙烯-丁烯聚烯烃弹性体(C4-POE)、乙烯-辛烯聚烯烃弹性体(C8-POE)、乙烯-辛烯聚烯烃塑性体(POP)、丙烯-乙烯共聚弹性体对PP的增韧改性效果。并进一步研究了滑石粉粒度(12, 5, 3 μm)及添加方式(直接共混、母粒预分散)对滑石粉质量分数20%的SEBS改性PP复合材料(PP+SEBS-TD20)的性能调控作用。结果表明,当SEBS的苯乙烯质量分数为10%~15%, MFR为10 g/10 min (测试温度230 $^{\circ}\text{C}$, 负荷2.16 kg), 丁二烯段1,2-聚合比例高于50%时,配合3 μm 滑石粉母粒作为填料,复合材料各组分散能够均匀分散,且具有优良的界面相容性,使得PP+SEBS-TD20实现刚韧平衡,缺口冲击强度达35 kJ/m²,同时弯曲模量保持2 905 MPa。该研究为具有刚韧平衡的高性能PP复合材料的配方优化提供了参考。

关键词: 聚丙烯; 苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯嵌段共聚物; 刚韧平衡; 界面相容性

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)07-0050-06

Influences of SEBS molecular structure and formulation composition on stiffness-toughness balance of modified polypropylene

LAI Ang^{1,2}, CHEN Shengjie¹, REN Sihua¹, FU Wei¹, CHEN Yao¹, ZHU Xiangyu², PENG Qingyi³

(1. Wuhan Kingfa Sci. & Tech. Co., Ltd., Wuhan 430109, China; 2. Kingfa Sci. & Tech. Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 3. Saic Volkswagen Automotive Co., Ltd., Shanghai 201805, China)

Abstract : Polypropylene (PP)-based composites were prepared via melt blending. The molecular structure parameters and melt flow rate (MFR) of styrene-ethylene-butene-styrene block copolymers (SEBS) are regulated by adjusting the styrene content and the 1, 2-polymerization ratio of butadiene segments. The influence mechanism of SEBS molecular structure on the rigidity-toughness balance performance of PP composites was investigated by mechanical property tests and microstructure analysis. A comparative study was conducted on the toughening modification effects of SEBS, ethylene-butylene polyolefin elastomer (C4-POE), ethylene-octene polyolefin elastomer (C8-POE), ethylene-octene polyolefin plastomer (POP), and propylene-ethylene copolymer elastomer on PP. Furthermore, the regulatory effect of different talcum powder particle sizes and addition methods on the properties of SEBS-modified PP composites with 20% talc mass fraction (PP+SEBS-TD20) was studied. The results show that when the styrene mass fraction of SEBS is 10%–15%, the MFR is 10 g/10 min (measured at 230 $^{\circ}\text{C}$ with a load of 2.16 kg), the 1, 2-polymerization ratio of the butadiene segment is higher than 50%, and 3 μm talc masterbatch is used as the filler, all components in the system are uniformly dispersed with excellent interfacial compatibility. This enables PP+SEBS-TD20 to achieve rigidity-toughness balance, with a notched impact strength of 35 kJ/m² and a flexural modulus maintained at 2 905 MPa. This study provides reference for the formulation optimization of high-performance PP composites.

Keywords : polypropylene ; styrene-ethylene-butylene-styrene block copolymer ; stiffness-toughness balance ; interfacial compatibility

通信作者: 陈胜杰, 硕士, 主要从事塑料加工与改性的研究

收稿日期: 2025-05-20

引用格式: 赖昂, 陈胜杰, 任思华, 等. SEBS分子结构及配方组成对改性聚丙烯刚韧平衡性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(7): 50–55.

LAI Ang, CHEN Shengjie, REN Sihua, et al. Influences of SEBS molecular structure and formulation composition on stiffness-toughness balance of modified polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7): 50–55.

聚丙烯(PP)作为一种综合性能优秀的通用塑料,具有轻量化优势(密度为 $0.90\sim 0.91\text{ g/cm}^3$),这一特性使其成为汽车轻量化的理想选择;其优异的化学惰性赋予了材料良好的耐腐蚀性,广泛应用于化工管道等制造领域;此外,PP还具有优秀的电绝缘性(介电常数为 $2.2\sim 2.6$),使其在电子电器领域占主导地位^[1-4]。值得强调的是,PP原料来源广泛、制备工艺成熟且成本低廉,这些优势进一步推动了其在工业化生产中的大规模应用。然而,PP在实际应用中也存在一些性能局限性,主要表现在:低温条件下冲击强度显著下降,使其在寒冷环境应用受限;当温度高于 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 时,PP的力学性能会有一定劣化,难以满足高温条件的使用需求^[5-10]。

针对上述缺陷,PP共混改性成为研究重点,其中同时提高材料的刚性与韧性成为了重要的研究方向。传统增韧剂(如橡胶)会导致刚性显著损失,而苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯嵌段共聚物(SEBS)通过其独特的微相分离结构,可实现刚韧平衡优化^[11-14]。这是因为SEBS分子链由聚苯乙烯硬段(S段,赋予刚性)与乙烯-丁烯软段(EB段,提供韧性)构成,两相协同作用有效提升PP基体抗冲击性(缺口冲击强度提升 $2\sim 3$ 倍)^[15-16]。同时,SEBS可降低PP熔体黏度(降幅达 $15\%\sim 30\%$),改善加工流动性,减少注塑缺陷(如流痕、缩孔),并依托氢化碳-碳双键结构增强耐候性,可以显著延长材料寿命^[17]。

已有许多研究将SEBS作为增韧剂成功应用于PP的改性中。Liu等^[18]以氢化SEBS作为增韧剂,通过熔融共混开发了高性能改性PP,掺入质量分数 20% SEBS后,PP的冲击强度显著提高,从 5.4 提高到 19.0 kJ/m^2 。Liu^[19]等研究了SEBS的苯乙烯含量、分子结构对热塑性弹性体(TPE)性能的影响,将SEBS改性TPE成功应用于汽车内饰蒙皮;宋建强等^[20]研究了滑石粉的引入对SEBS/PP热塑性弹性体拉伸性能、密度、硬度及熔体流动速率(MFR)的影响,从总体上看,所用滑石粉的粒径越小,SEBS/PP热塑性弹性体的拉伸性能越好,MFR越小。

在前人工作的基础上,笔者针对SEBS的结构特征进行更深入的剖析,不仅对苯乙烯含量、熔体流动速率进行了验证,还针对前人未评估过的丁二烯的 $1,2$ -聚合比例进行了研究,系统地分析了SEBS的结构特征对于滑石粉质量分数 20% 的SEBS改性滑石粉/PP(PP+SEBS-TD20)复合材料刚

韧平衡的影响规律。为了更全面地对比SEBS的刚韧平衡优势,笔者还对验证了不同的聚烯烃弹性体(POE)、乙烯-辛烯聚烯烃塑性体(POP)、丙烯-乙烯共聚弹性体作为增韧剂时对改性PP复合材料性能的影响。此外,为了进一步提高材料物性指标,笔者还拓展了对配方体系的验证,制备了具有高强度、高韧性的改性PP材料,这对拓展改性PP的应用边界、促进高端制造领域材料升级具有一定的工程意义。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PP:MFR为 100 g/10 min (测试温度 $230\text{ }^\circ\text{C}$,负荷 2.16 kg ,后文所有MFR均采用此条件测定),结晶度 44% ,乙烯丙烯共聚物(EPR)含量 8% ,埃克森美孚亚太研发有限公司;

乙烯-丁烯 POE(C4-POE): MFR 为 10 g/10 min ,陶氏化学(中国)投资有限公司;

乙烯-辛烯 POE(C8-POE): MFR 为 12 g/10 min ,陶氏化学(中国)投资有限公司;

POP:MFR为 10 g/10 min ,韩国大林;

丙烯-乙烯共聚弹性体(Vistamaxx): MFR 为 2 g/10 min ,埃克森美孚亚太研发有限公司;

SEBS 1:MFR 为超低(不熔)、苯乙烯含量高[质量分数(下同) $>30\%$]、侧基含量低(丁二烯 $1,2$ -聚合比例低于 20%),李长荣化学工业股份有限公司;

SEBS 2:MFR 为 0.5 g/10 min 、苯乙烯含量中等($20\%\sim 30\%$)、侧基含量低(丁二烯 $1,2$ -聚合比例低于 20%),李长荣化学工业股份有限公司;

SEBS 3:MFR 为 10 g/10 min 、苯乙烯含量低($10\%\sim 15\%$)、侧基含量低(丁二烯 $1,2$ -聚合比例低于 20%),浙江众立合成材料科技股份有限公司;

SEBS 4:MFR 为 10 g/10 min 、苯乙烯含量低($10\%\sim 15\%$)、侧基含量高(丁二烯 $1,2$ -聚合比例高于 50%),浙江众立合成材料科技股份有限公司;

滑石粉:粒度规格[中值粒径(D_{50})]涵盖 $12, 5, 3\text{ }\mu\text{m}$ (分别对应 $1\ 250, 3\ 000, 5\ 000$ 目),英格瓷(芜湖)有限公司;

滑石粉母粒:粒度规格(D_{50})涵盖 $12, 5, 3\text{ }\mu\text{m}$ (分别对应 $1\ 250, 3\ 000, 5\ 000$ 目),粉体质量分数 80% ,基体树脂为共聚PP(MFR 为 100 g/10 min ,结晶度 40%),质量分数 20% ,金发科技股份有限公司;

抗氧剂 1:受阻酚类抗氧剂,汽巴精化(中国)有

限公司;

抗氧剂 2:亚磷酸酯类抗氧剂,汽巴精化(中国)有限公司;

润滑剂:硬脂酸锌母粒,金发科技股份有限公司。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机:SHJ-30 型,南京瑞亚高聚物装备有限公司;

注塑机:B-920,浙江海天注塑机有限公司;

万能材料试验机:Z010,德国 Zwick 公司;

冲击试验机:892,美国 Tinius Olsen 公司;

MFR 测试仪:BMF-001,德国 Zwick 公司;

扫描电子显微镜(SEM):ESEM XL-30,荷兰 FEI 电子光学有限公司。

1.3 试样制备

按表 1 所示配比称取原料,经高混机混匀,然后在双螺杆挤出机中挤出造粒,螺杆转速设为 550 r/min,挤出温度 1 区为 65 ℃,2 区为 160 ℃,3 区为 190 ℃,4~12 区为 210 ℃,喂料速度为 35 kg/h。将不同增韧剂改性 PP 复合材料塑料粒子在 190~220 ℃条件下注塑成标准样条。

表 1 不同增韧剂改性 PP 复合材料的配方(质量分数)

Tab. 1 Formulation of polypropylene composites modified with different toughening agents (mass fraction)

Components	Samples							
	0 [#]	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]
PP	63.4	63.4	63.4	63.4	63.4	63.4	63.4	63.4
C4-POE	16							
C8-POE		16						
POP			16					
Vistamaxx				16				
SEBS 1					16			
SEBS 2						16		
SEBS 3							16	
SEBS 4								16
5 μm talc	20	20	20	20	20	20	20	20
Antioxidant1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Antioxidant2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Lubricant	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

采用同样方法,制备滑石粉粒度、添加方式不同的 PP+SEBS-TD20 复合材料标准样条,材料配方见表 2。

1.4 测试与表征

力学性能测试:弯曲性能按照 ISO 178:2010 测试,测试速度为 2 mm/min;悬臂梁缺口冲击强度按

表 2 不同滑石粉粒度及添加方式的 PP+SEBS-TD20 复合材料配方(质量分数)

Tab. 2 Formulations of PP+SEBS-TD20 composites with different talc particle sizes and addition methods (mass fraction)

Components	Samples					
	8 [#]	9 [#]	10 [#]	11 [#]	12 [#]	13 [#]
PP	63.4	63.4	63.4	58.4	58.4	58.4
SEBS 4	16	16	16	16	16	16
12 μm talc	20					
5 μm talc		20				
3 μm talc			20			
PP-based 12 μm talc msterbatch				25		
PP-based 5 μm talc msterbatch					25	
PP-based 3 μm talc msterbatch						25
Antioxidant1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Antioxidant2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Lubricant	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

照 ISO 180:2019 测试,采用 A 型缺口样条。

MFR 测试:参照 ISO 1133:2011,采用 MFR 测试仪在 230 ℃,2.16 kg 的条件下进行测试。

微观形貌观察:将悬臂梁缺口冲击试样放入液氮中冷冻并脆断,然后使用四氢呋喃浸泡 48 h 刻蚀掉橡胶相后,对断面喷金,最后采用 SEM 进行观察并拍照。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

图 1 为不同增韧剂改性 PP 复合材料的力学性能测试结果。从整体的力学对比数据可见,常用的增韧剂中,POE 由于碳链较长,玻璃化转变温度低,由其制备的样品(0[#],1[#])缺口冲击强度较高,然而 POE 会使弯曲模量下降显著。POP 结晶度较高,长碳链共聚物含量较低,由其制备的样品(2[#])缺口冲击强度较低,而弯曲模量有所保持。针对威达美,则是由于其结构与 PP 高度接近,两者相容性极好,无法有效引发银纹,使增韧机制失效,因此由该类增韧剂制备的样品(3[#])缺口冲击强度与弯曲模量较低。针对四种 SEBS 的改性样品,弯曲模量普遍高于添加其他增韧剂的样品,这主要是因为 SEBS 的聚苯乙烯硬段含有苯环,具有较大的刚性,能够提高材料的强度和刚性。横向对比四种 SEBS 可以发现,随着 SEBS 的 MFR 及 1,2-聚合比例提高,刚韧平衡效果逐渐提高。由此可见,高 MFR、高 1,2-聚合比例的 SEBS 的刚韧平衡效果优于其他传统的增韧剂。值得注意的是,由于各类增韧剂的 MFR 不同,对改性 PP 的 MFR 影响较大。表 3 中,使用较高

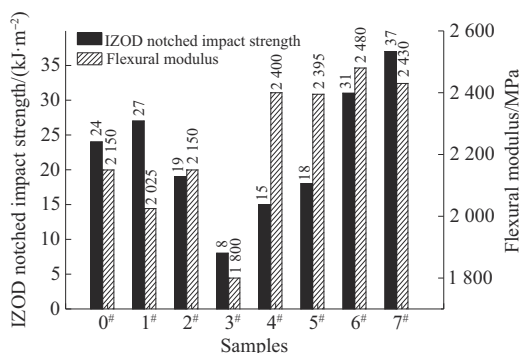


图1 不同增韧剂改性PP复合材料的力学性能

Fig. 1 Mechanical properties of polypropylene composites modified with different toughening agents

表3 不同增韧剂改性PP复合材料的MFR

Tab. 3 MFR of polypropylene composites modified with different toughening agents

Item	Samples							
	0 [#]	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]
MFR/[g·(10 min) ⁻¹]	45	48	43	33	22	30	42	41

MFR的SEBS改性PP的MFR可达40 g/10 min以上,这极大地改善了该材料在注塑应用端的工艺难度,有效减少了多种注塑缺陷(如流痕、缩孔等),并且使该材料在一些薄壁产品上也可以成功应用。

为了进一步提高材料的刚韧平衡力学性能,制备了滑石粉粒度、添加方式不同的PP+SEBS-TD20复合材料,对比验证了滑石粉粒度、添加方式对材料性能的影响。表4为各样品的力学性能,相比于12 μm滑石粉,添加5 μm滑石粉的样品弯曲模量提高75 MPa,并且缺口冲击强度也略有提升。这是因为高粒度的滑石粉比表面积更大,意味着更多的界面相互作用,这有助于应力从基体向填料的有效传递,从而提高复合材料的刚性。因此,滑石粉粒度提高有利于材料的刚韧平衡。然而,使用3 μm滑石粉时,弯曲模量却下降了50 MPa,这主要是因为粒度越高的滑石粉粒径越小,粉体更细,在加工过程中会导致架桥、难以下料的问题,使滑石粉在PP基体中分散不均匀。因此,开发了对应粒度的滑石粉

表4 不同滑石粉粒度及添加方式的PP+SEBS-TD20复合材料的力学性能

Tab. 4 Mechanical properties of PP+SEBS-TD20 composites with different talc particle sizes and addition methods

Items	Samples					
	8#	9#	10#	11#	12#	13#
IZOD notched impact strength/(kJ·m ⁻²)	35.8	37	36	36	34	35
Flexural modulus/MPa	2 355	2 430	2 305	2 590	2 780	2 905

母粒,有效解决了下料问题,改善了滑石粉在PP基体中的分散性。均匀分散的滑石粉能够有效阻止裂纹的扩展,同时滑石粉与PP基体之间良好的界面相容性使改性材料在保持冲击韧性相当的基础上提高材料的刚性。综上所述,使用高粒度的滑石粉母粒使得材料刚韧平衡性能进一步提升。

2.2 微观结构

通过SEM对不同配方的PP+SEBS-TD20复合材料的微观形貌进行观察,图2为不同SEBS改性的PP+SEBS-TD20复合材料的SEM照片。

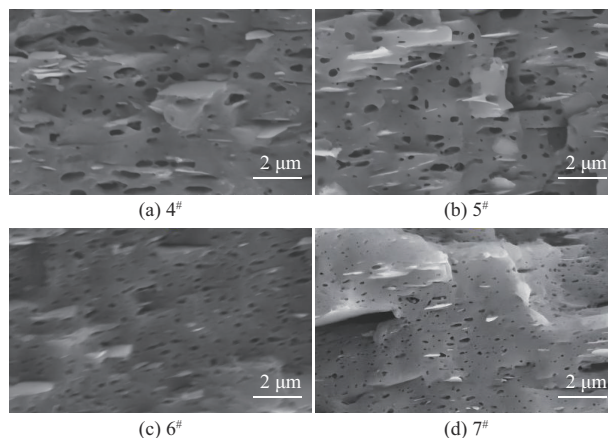


图2 不同SEBS改性的PP+SEBS-TD20复合材料的断面SEM照片

Fig. 2 Section SEM photos of PP+SEBS-TD20 composites modified with different types of SEBS

图2中,孔洞为刻蚀后的SEBS的位置。由图2可以看出,SEBS颗粒与PP基体存在一定的界面,4#与5#的SEBS颗粒分散相对均匀,但仍有少量团聚导致孔洞过大,这是因为SEBS 1与SEBS 2的MFR较低,在PP基体中的分散程度不良。而SEBS 3和SEBS 4的MFR较高,在熔融状态下具有较低的黏度,更易于流动和变形。在共混过程中,低黏度的弹性体更容易被剪切力分散成更小的颗粒,并均匀分布在PP基体中。从热力学相容性角度分析,高MFR的SEBS在熔融状态下更容易与PP基体发生界面相互作用,形成更紧密的界面结合。这有助于减少相分离,提高分散均匀性。从动力学因素分析,高MFR的SEBS在加工过程中具有更快的流动和变形能力,能够在较短的时间内达到均匀分散的状态。此外,SEBS 4的1,2聚合的比例提高,从结构上会引入更多的侧基,这种侧基的结构与PP相近,会进一步改善SEBS与PP基体的相容性。综上所述,SEBS 4在PP基体中的分散程度最佳。

2.3 SEBS 结构及配方组成对改性聚丙烯刚韧平衡性能的影响机制

在 PP+SEBS-TD20 复合材料中,SEBS 作为分散相分布于 PP 基体中,其粒径尺寸对材料的增韧效果具有显著影响。聚合物增韧机制的核心理论是应力体积球理论^[21],根据理论中公式证明[式(1)、式(2)和式(3)],较小的分散相尺寸能够更均匀地分布于基体中,提供更多的应力集中点,从而有效提升材料的韧性。对于式中的脆韧转变条件,关键影响因素是增韧剂的粒径与间距,较小的增韧剂粒径($<1\ \mu\text{m}$)与较短的粒子间距($<0.5\ \mu\text{m}$)可显著促进脆韧转变。因此,本研究使用的均匀分散的 SEBS 颗粒能够诱导多重银纹和剪切带,有效耗散冲击能量。

$$S_c = d_c + D_c \quad (1)$$

$$V_{sc} = V_{fc} \cdot \left(\frac{S_c}{d_c}\right)^3 \quad (2)$$

$$V_{sc} = V_{fc} \cdot \left[1 + \left(\frac{D_c}{d_c}\right)^3\right] \quad (3)$$

式中: S_c 为应力体积球临界直径; d_c 为分散相临界粒径; D_c 为临界粒子间距; V_{sc} 为脆韧转变临界条件; V_{fc} 为分散相临界体积分数。

从分子结构层面分析,SEBS 中苯乙烯嵌段含量是调控材料性能的关键因素。苯乙烯含量的增加会提高 SEBS 的模量,但同时需要兼顾与 PP 基体的相容性。如图 3 所示,1,2-聚合会引入乙烯基侧链,氢化后的侧链结构与 PP 的侧链相似,因此更易与 PP 基体相容。通过调节 1,2-聚合比例可以改善界面相容性,使 SEBS 在基体中达到更理想的分散状态。实验结果表明,选择合适的苯乙烯含量配合适当的 1,2-聚合比例,可以在保证一定刚性的同时

获得良好的增韧效果。

在复合改性体系中,滑石粉作为刚性填料与 SEBS 存在协同效应。高粒度滑石粉由于粒径更小,比表面积更大,在基体中的分散效果更好。通过母粒化工艺处理,可以进一步提高滑石粉的分散均匀性,避免团聚现象。这种均匀分散的滑石粉不仅能够提升材料的刚性,还能与 SEBS 共同构建特殊的“刚性-韧性”网络结构,实现优异的综合性能。

3 结论

(1)SEBS 分子结构对改性 PP 复合材料性能的影响:SEBS 中苯乙烯含量、熔体流动速率(MFR)及 1,2-聚合比例是关键调控因素。提高苯乙烯含量可增加 SEBS 中聚苯乙烯硬段比例,增强分子链间作用力,从而提升材料刚性,但需优化其与 PP 基体的相容性以兼顾韧性。MFR 较高的 SEBS 流动性更好,可改善其在 PP 中的分散性,而提高 1,2-聚合比例则能增加侧基含量,增强 SEBS 与 PP 的相容性,减少相分离,最终实现优异的刚韧平衡性能。

(2)滑石粉粒度与其添加方式对改性 PP 复合材料性能的影响:高粒度滑石粉在 PP 基体中分散性更好,但过细的粉体易导致加工困难,如架桥、下料不均等问题。通过母粒化工艺可有效改善高粒度滑石粉的分散均匀性,避免团聚,并与 SEBS 协同作用,进一步提升材料的力学性能。

(3)改性 PP 复合材料微观结构与性能关系:微观结构分析表明,SEBS 的分散状态及界面结合情况对材料性能至关重要。当 SEBS 以细小颗粒均匀分散于 PP 基体时,材料表现出良好的力学性能;而 SEBS 团聚则会导致应力集中,降低材料的韧性。

综合上述研究结果,SEBS 分子结构(苯乙烯含量、MFR、1,2-聚合比例)和滑石粉的分散性(粒度及母粒化工艺)是调控 PP 刚韧平衡的关键因素。通过合理优化这些参数,可针对不同应用需求设计高性能 PP 复合材料,满足多样化的工程应用要求。

参考文献

- [1] SEKI Y, SELLI F, ERDOĞAN Ü H, et al. A review on alternative raw materials for sustainable production: Novel plant fibers[J]. Cellulose, 2022, 29(9):4 877–4 918.
- [2] 刘璇,崔益华,杨赞,等.纳米 SiO₂@黄麻纤维/PP 复合材料多相界面结构与增韧机制[J].复合材料学报, 2022, 39(3):1 026–1 035.
- LIU Xuan, CUI Yihua, YANG Yun, et al. Multi-phase interface structure and toughening mechanism for nano-SiO₂@jute fiber/PP composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(3): 1 026–1 035.

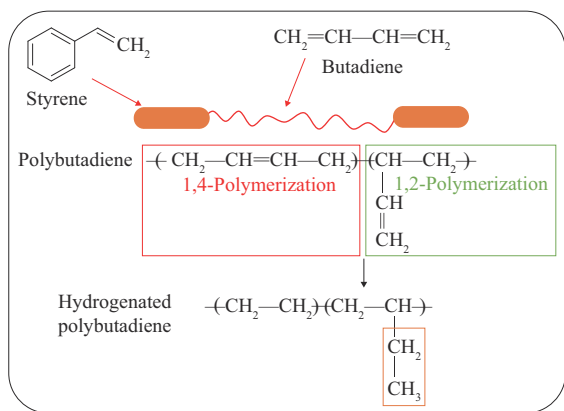


图3 SEBS 分子结构示意图

Fig. 3 Molecular structure diagram of SEBS

- [3] 杨国兴,王立娟,王焱鹏,等.聚烯烃弹性体增韧共聚聚丙烯的研究[J].现代塑料加工应用,2020,32(2):9-11.
YANG Guoxing, WANG Lijuan, WANG Yanpeng, et al. Toughening of copolymerized polypropylene with polyolefin elastomer[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2020, 32(2):9-11.
- [4] 彭二磊,马壮,苏艳文,等.新型环保聚丙烯绝缘中压电力电缆的研究[J].电线电缆,2021(5):13-16.
PENG Erlei, MA Zhuang, SU Yanwen, et al. Research on new type environmental polypropylene insulated medium voltage power cable[J]. Wire & Cable, 2021(5):13-16.
- [5] 武卫莉,李响,王毅文.增韧剂和成核剂对PP/LLDPE/HDPE共混膜性能的影响[J].塑料,2021,50(3):50-53,77.
WU Weili, LI Xiang, WANG Yiwen. Effect of toughening agent and nucleating agent on the properties of PP/LLDPE/HDPE blend film[J]. Plastics, 2021, 50(3):50-53, 77.
- [6] 姜艳峰,邱冬,张明强,等.低熔抗冲共聚PP专用料的制备与性能[J].现代塑料加工应用,2023,35(2):20-22,26.
JIANG Yanfeng, QIU Dong, ZHANG Mingqiang, et al. Preparation and properties of the special materials for low-melting and impact polypropylene copolymer[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2023, 35(2):20-22, 26.
- [7] 李花,姚云,高莹,等.中国聚丙烯市场现状及发展趋势[J].中外能源,2022,27(10):63-69.
LI Hua, YAO Yun, GAO Ying, et al. Current situation and development trends of polypropylene market in China[J]. Sino-Global Energy, 2022, 27(10):63-69.
- [8] SHIRVANIMOGHADDAM K, BALAJI K V, YADAV R, et al. Balancing the toughness and strength in polypropylene composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 223. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109121.
- [9] 王伟,王天宇,董彦惠,等. SEBS与 nano-CaCO₃协同增韧PP的配方研究[J].辽宁化工,2023,52(5):623-626,633.
WANG Wei, WANG Tianyu, DONG Yanhui, et al. Formulation study of synergistic toughening PP by SEBS and nano-CaCO₃[J]. Liaoning Chemical Industry, 2023, 52(5):623-626, 633.
- [10] 苟荣恒,王勇,刘义,等.高流动抗冲共聚聚丙烯的结构与性能[J].合成树脂及塑料,2022,39(6):51-54.
GOU Rongheng, WANG Yong, LIU Yi, et al. Structure and properties of high fluidity impact copolymerized polypropylene[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2022, 39(6):51-54.
- [11] PENG H, LU M, LV F C, et al. Understanding the effect of silane crosslinking reaction on the properties of PP/POE blends[J]. Polymer Bulletin, 2019, 76(12):6 413-6 428.
- [12] 张小林,程金星,陶影,等.新型热塑性弹性体SEBS及其改性的研究进展[J].弹性体,2005,15(6):72-76.
ZHANG Xiaolin, CHENG Jinxing, TAO Ying, et al. Advances in new thermoplastic elastomer SEBS and its modification[J]. China Elastomerics, 2005, 15(6):72-76.
- [13] ZHANG F, HU C B, ZHANG Y. Research for SEBS/PPA compound-modified asphalt[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135(14). DOI:10.1002/app.46085.
- [14] 胡胜,侯一凡,王雄,等.橡胶与弹性体增韧改性聚丙烯的研究进展[J].合成树脂及塑料,2019,36(5):104-109.
HU Sheng, HOU Yifan, WANG Xiong, et al. Research progress of rubber and elastomer toughening modified PP[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2019, 36(5):104-109.
- [15] SUN J W, LI Q, JIANG Y F, et al. Lightweight and high impact toughness PP/PET/POE composite foams fabricated by in situ nanofibrillation and microcellular injection molding[J]. Polymers, 2023, 15(1). DOI:10.3390/polym15010227.
- [16] ZHANG G, NAM C, MIKE CHUNG T C, et al. Polypropylene copolymer containing cross-linkable antioxidant moieties with long-term stability under elevated temperature conditions[J]. Macromolecules, 2017, 50(18):7 041-7 051.
- [17] 樊林祺,李琦,袁浩,等.接枝对聚丙烯绝缘材料热氧老化的影响及机理[J].中国电机工程学报,2022,42(11):4 227-4 237.
FAN Linzhen, LI Qi, YUAN Hao, et al. Influence and mechanism of grafting on thermal oxidative aging of polypropylene[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11):4 227-4 237.
- [18] LIU J W, WANG W, SONG L X, et al. Preparation and performance study of polypropylene composites modified with different functionalized SEBS and nano-CaCO₃[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2024, 6(18):11 370-11 382.
- [19] LIU S W, QIU J, HAN L L, et al. Effect of SEBS molecular structure and formula composition on the performance of SEBS/PP TPE for automotive interior skin[J]. Polymers, 2023, 15(12). DOI: 10.3390/polym15122753.
- [20] 宋建强,曾国元,曾晓勇,等.滑石粉在SEBS/PP热塑性弹性体中的应用[J].工程塑料应用,2019,47(6):123-127.
SONG Jianqiang, ZENG Guoyuan, ZENG Xiaoyong, et al. Application of talcum powder in SEBS/PP thermoplastic elastomer[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(6):123-127.
- [21] WU S H. A generalized criterion for rubber toughening: The critical matrix ligament thickness[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1988, 35(2):549-561.