

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.06.004

苯乙烯-乙烯-丙烯-苯乙烯共聚物改性聚乙烯 消光薄膜制备与性能

杨康^{1,2,3}, 曾舒^{1,2,3}, 黄晓泉^{1,2,3}, 张怡^{1,2,3}, 王聚恒^{1,2,3}, 麻玉龙^{1,2,3}, 钟安澜^{1,2,3}, 刘蔚凯^{1,2,3}

(1. 贵州省冶金化工研究所, 贵阳 550014; 2. 贵州省纳米材料工程中心, 贵阳 550014; 3. 贵州天润达科技有限公司, 贵阳 550014)

摘要: 以苯乙烯-乙烯-丙烯-苯乙烯共聚物(SEPS)共混改性线性低密度聚乙烯(PE-LLD), 通过流延工艺制备了PE-LLD/SEPS共混物消光薄膜。测试了不同SEPS含量下PE-LLD/SEPS共混物的流变性能、熔融结晶行为及相应薄膜的光学和力学性能。结果表明, PE-LLD/SEPS共混物呈现单一熔融峰, 说明两种组分具有良好的相容性; 随SEPS含量增加, PE-LLD的结晶度以及共混物的表观黏度逐渐降低, 消光薄膜的雾度、纵横向拉伸强度和断裂伸长率, 以及耐穿刺强度和落镖冲击强度逐渐上升, 而透光率和光泽度降低。当SEPS质量分数为20%时, 薄膜的雾度为68.56%, 透光率为89.36%, 光泽度为6.04 GU, 呈现优异的消光特性; 当SEPS质量分数为10%~20%时, 薄膜纵横向拉伸强度差值较小, 表现出良好的纵横向拉伸强度均匀性。扫描电子显微镜观察结果进一步证实了SEPS对PE-LLD具有显著的增韧效应。综上所述, SEPS改性PE-LLD制备的消光薄膜在力学性能、加工性能及消光特性等方面表现出优异的综合性能, 有望在高端快速包装领域获得广泛应用。

关键词: 苯乙烯-乙烯-丙烯-苯乙烯共聚物; 聚乙烯; 消光薄膜; 共混改性; 消光特性

中图分类号: TQ325.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)06-0024-08

Preparation and properties of styrene-ethylene-propylene-styrene copolymer modified polyethylene matte films

YANG Kang^{1,2,3}, ZENG Shu^{1,2,3}, HUANG Xiaoxiao^{1,2,3}, ZHANG Yi^{1,2,3}, WANG Juheng^{1,2,3},
MA Yulong^{1,2,3}, ZHONG Anlan^{1,2,3}, LIU Weikai^{1,2,3}

(1. Guizhou Institute of Metallurgy and Chemical Engineering, Guiyang 550014, China;

2. Guizhou Nanomaterials Engineering Center, Guiyang 550014, China; 3. Guizhou Tianrunda Technology Co., Ltd., Guiyang 550014, China)

Abstract : The blending modification of linear low-density polyethylene (PE-LLD) was carried out by styrene-ethylene-propylene-styrene copolymer (SEPS) and PE-LLD/SEPS blend matte films were prepared by casting process. The rheological properties, melting crystallization behaviors of PE-LLD/SEPS blends and optical and mechanical properties of corresponding films were tested under different SEPS contents. The results show that the PE-LLD/SEPS blend shows a single melting peak, indicating that the two components have good compatibility. With the increase of SEPS content, the crystallinity of PE-LLD and the apparent viscosity of the PE-LLD/SEPS blends gradually decreases, the haze, tensile strength and elongation at break in longitudinal and transverse direction, anti-puncture strength and dart impact strength of the matte film all gradually increases, while the light transmittance and glossiness decrease accordingly. When the mass fraction of SEPS is 20%, the haze of the film is 68.56%, the light transmittance is 89.36%, and the glossiness is 6.04 GU, presenting excellent matting characteristics. When the mass fraction of SEPS is 10%–20%, the difference in the longitudinal and transverse tensile strength of the film is small, showing good uniformity of the longitudinal and transverse tensile strength. Scanning electron microscope observations further confirm the significant toughening effect of SEPS on

基金项目: 贵州省科技成果转化重大专项(黔科合成果[2024]重大002), 贵州省青年引导基金项目(黔科合基础-[2024]青年373), 贵州省冶金化工研究所发展基金项目(黔科冶化字KF[2025]02号), 贵州科学院青年基金项目(黔科院J字[2024]3号)

通信作者: 刘蔚凯, 工程师, 主要从事聚烯烃功能化改性

收稿日期: 2025-04-24

引用格式: 杨康, 曾舒, 黄晓泉, 等. 苯乙烯-乙烯-丙烯-苯乙烯共聚物改性聚乙烯消光薄膜制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(6): 24–31.

YANG Kang, ZENG Shu, HUANG Xiaoxiao, et al. Preparation and properties of styrene-ethylene-propylene-styrene copolymer modified polyethylene matte films[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(6): 24–31.

PE-LLD. In summary, the matting films prepared from SEPS-modified PE-LLD show excellent comprehensive performances in mechanical properties, processing performance and matting characteristics, and is expected to be widely used in high-end fast packaging.

Keywords : styrene-ethylene-propylene-styrene copolymer ; polyethylene ; matte film ; blending modification ; matting characteristic

聚乙烯(PE)薄膜因其优异的力学性能、光学性能、低温韧性和防水防潮特性,被广泛应用于食品、纺织品、日用消费品以及电子产品的包装领域^[1-3]。近年来,随着社会经济的快速发展,市场对高档包装材料的需求持续增长,尤其对视觉柔和且外观美观的包装材料需求显著提升,推动了高雾度、高透光率且低光泽的消光PE薄膜成为研究开发的热点^[4-6]。

目前,实现PE薄膜消光特性的主要途径主要包括添加无机消光粉和采用聚合物共混改性两种方式。在添加消光粉方面,主要是利用无机粉体不同粒径、折射率及添加量在PE中产生瑞利散射效应提高薄膜的雾度,赋予PE薄膜消光特性,常用的消光粉主要包括二氧化硅、碳酸钙、滑石粉和硅藻土等^[7-8],而消光粉的引入虽然可提高薄膜雾度和消光性能,但严重降低薄膜透光率甚至导致不透光,严重影响薄膜在高端包装方面的应用,并且消光粉在流延过程中容易造成滤网和模头堵塞,增加挤出机螺杆背压,导致PE的加工性能不足影响薄膜质量和产量。在聚合物共混改性方面,主要是利用不同聚合物与PE之间的折射率差异及其结晶行为的不同,在薄膜内部或表面形成微小相区,通过相区间折射率和几何尺寸的差异增加光线的多次折射和表面反射,使薄膜呈现消光效果,而且聚合物共混改性不会对PE薄膜的透光率造成严重下降,在提高薄膜雾度的同时保持较高的透光率^[9-11]。在此研究背景下,相关科技工作者进行了大量研究。Qiao等^[12]研究了不同比例的硫酸钙晶须(CSW)对PE温室薄膜力学性能和透光率的影响,结果表明,与纯PE相比,CSW/PE薄膜的力学性能和透光率均有所提升。当CSW质量分数为2%时,薄膜的撕裂强度提高了18.6%,透光率提高了2.8%,雾度增加了8.3%;当CSW质量分数为5%时,拉伸强度提高了12.8%,撕裂强度提高了20.5%,透光率降低了21.1%,雾度增加了43.6%。Ali等^[13]基于PE和离子共聚物乙烯/甲基丙烯酸(EMAA)共混改性,通过吹膜法制备了PE消光膜,研究发现随着牵引比(TUR)的增加,膜的润

湿性增强,雾度也随之增加,而透光率几乎不受TUR的影响。王志春^[14]采用热塑性弹性体(TPE)共混改性高密度聚乙烯(PE-HD),制备了PE消光薄膜,研究发现TPE/PE-HD薄膜的结晶度低于纯PE-HD薄膜,随着TPE含量的增加,薄膜的表面粗糙度增加,微观晶体结构分布更加均匀,雾度也随之增加。

苯乙烯-乙烯-丙烯-苯乙烯共聚物(SEPS)作为一种热塑性弹性体,常用于PE的增韧改性。目前SEPS改性PE的研究主要集中在力学性能、相容性及增韧机理等方面,而关于SEPS对PE光学性能和消光特性的影响规律研究的相关报道较少。因此,笔者基于上述研究基础,采用SEPS共混改性线型低密度聚乙烯(PE-LLD),通过流延工艺制备PE消光薄膜,通过光学、力学、流变等相关性能测试以揭示SEPS对PE消光薄膜性能的影响规律。与上述研究比较,以SEPS改性PE-LLD不仅可提升PE消光薄膜的消光性能,而且对PE-LLD还具有增韧改性效果,有利于提升PE消光薄膜的耐穿刺性能和冲击性能,此外,流延工艺制备的PE消光薄膜厚度均匀性较好、质量稳定,为PE消光薄膜的制备提供了技术借鉴。

1 实验部分

1.1 主要原材料

SEPS: Septon 2063, 熔体流动速率(MFR)为7.2 g/10 min (2.16 kg, 230 °C), 日本可乐丽公司;

PE-LLD: 7042, MFR为2.0 g/10 min (2.16 kg, 190 °C), 中国石化集团茂名石油化工有限公司;

抗氧剂 168: 三[2,4-二叔丁基苯基]亚磷酸酯, 优级品, 营口风光新材料股份有限公司;

抗氧剂 1010: 四[β-(3,5-二叔丁基-4-羟基苯基)丙酸]季戊四醇酯, 优级品, 北京极易化工有限公司;

费托蜡: SX105, 优级品, 马来西亚壳牌公司;

硬脂酸钙: CV-A, 优级品, 广东汉维科技有限公司。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机造粒机: SHJ-65, 南京杰恩特机

电有限公司;

注塑机:HXM65,山东轩宇塑料机械有限公司;

单螺杆三层共挤流延机组:XH432,东莞重兴机器设备科技有限公司;

高速搅拌机:SHR,张家港繁昌新技术开发有限公司;

万能拉伸试验机:HZ1003B,上海恒准仪器科技有限公司;

光电雾度仪:SGW-810,上海仪电物理光学仪器有限公司;

光泽度仪:NHG268,深圳三恩时科技有限公司;

光纤光谱仪:BSHCE,东莞百思光电科技有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):EM-30,韩国库塞姆公司;

差示量热扫描(DSC)仪:DSC-25,美国TA公司;

毛细管流变仪:RCSI-20/28,广州市普同实验分析仪器有限公司;

自由落镖冲击试验仪:BMC-A,济南新准仪器设备有限公司。

1.3 试样制备

第一步,按照表1中添加比例准确称量各种原料,依次投入高速搅拌机中充分搅拌混合均匀,搅拌时间为5 min;第二步;采用双螺杆挤出造粒机将混合均匀的每组原料挤出造粒、水冷拉条、切粒获得PE-LLD/SEPS共混物消光专用料,挤出温度为140~190℃,螺杆转速为20 r/min,并在60℃的条件下干燥24 h以排出水分;第三步,将烘干的每组PE-LLD/SEPS共混物通过流延机组制备厚度为0.05 mm的PE-LLD/SEPS共混物消光薄膜,流延机螺杆转速为30 r/min,挤出温度为160~210℃,冷却辊温度为25℃。

表1 PE-LLD/SEPS消光薄膜制备配方(质量分数)

Tab. 1 Preparation formula of PE-LLD/SEPS matte film (mass fraction)

Materials	Samples				
	I	II	III	IV	V
SEPS	0	10	20	30	40
PE-LLD	98	88	78	68	58
168	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
1010	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
SX105	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
CV-A	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

1.4 测试与表征

1.4.1 流变性能测试

称取300~500 g的PE-LLD/SEPS共混物树脂颗粒,采用毛细管流变仪测试共混物的表观黏度和剪切速率,设置螺杆转速为5,10,15,20,25,30,35,40 r/min,不同转速条件下测试时间为120 s,测试温度为190℃。

1.4.2 熔融结晶性能测试

参照GB/T 19466.3-2004,采用DSC仪进行测试,称取3~5 mg共混物样品置于铝坩埚中,以20℃/min的升温速率升温至200℃,恒温10 min以消除热历史。然后以10℃/min的速率降温至40℃,记录结晶曲线,再以相同的速率升温至200℃,记录熔融曲线。试样的结晶度(X_c)按公式(1)计算。

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100\% \tag{1}$$

式中: ΔH_m 为待测试样的熔融焓; ΔH_m^0 为PE-LLD结晶度100%时对应熔融吸收的热焓,取值293 J/g^[15];

1.4.3 光学性能测试

参照GB/T 2410-2008,每种薄膜裁取5组表面平整、无破损、无明显瑕疵、尺寸大小为50 mm×50 mm×0.05 mm的试样,采用光电雾度仪以C光源测定透光率和雾度,取平均值。

参照GB/T 8807-1988,每种薄膜裁取7组表面平整、无破损、无明显瑕疵、尺寸大小为50 mm×25 mm×0.05 mm的试样,采用光泽度仪在角度45°条件下测试样品薄膜的光泽度,取平均值。

裁取表面平整、无破损、无明显瑕疵、尺寸大小为50 mm×50 mm×0.05 mm的试样,采用光纤光谱仪测试薄膜在波长400~900 nm下的透光率。设置合适积分时间,一般设置光源曲线接近饱和80%处的积分时间为合适积分时间。测量背景光谱,在积分球入口处遮挡光源,软件默认处于计数模式,按下Continue按钮开始连续测量,测量完成点击Dark按钮,软件将自动保存背景光谱。测量光源光谱,透射测量时,一般选择样品台上不放置任何物品时的状态为参比状态,测量样品透射光谱时,换上PE-LLD/SEPS薄膜样品,点击透射按钮进行透光率测量。

1.4.4 力学性能测试

参照GB/T 37841-2019,每种薄膜裁取10组表

面平整、无破损、无明显瑕疵、尺寸大小为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 0.05\text{ mm}$ 的试样,采用万能拉伸试验机测试薄膜的耐穿刺强度,取平均值。

参照 GB/T 9639.1-2008 中 A 法,采用自由落镖冲击试验仪测试薄膜的落镖冲击强度(采用标准中的冲击破损质量数值表示,单位 g),薄膜表面平整、无破损、无明显瑕疵,尺寸大小为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 0.05\text{ mm}$ 。

参照 GB/T 1040.3-2006 制备 2 型试样,通过万能拉伸试验机测试薄膜的拉伸性能,拉伸速度 200 mm/min ,每种样品测试 7 组取平均值。

1.4.5 断面微观结构观察

将 PE-LLD/SEPS 薄膜样品通过液氮冷却,脆断,断面喷金处理,通过 SEM 观察断面微观形貌特征。

2 结果与讨论

2.1 SEPS 对 PE-LLD/SEPS 共混物流变性能的影响

图 1 为不同 SEPS 含量的 PE-LLD/SEPS 共混物的流变性能。由图 1 可知,在相同螺杆转速条件下,随着 SEPS 质量分数的增加,PE-LLD/SEPS 共混物

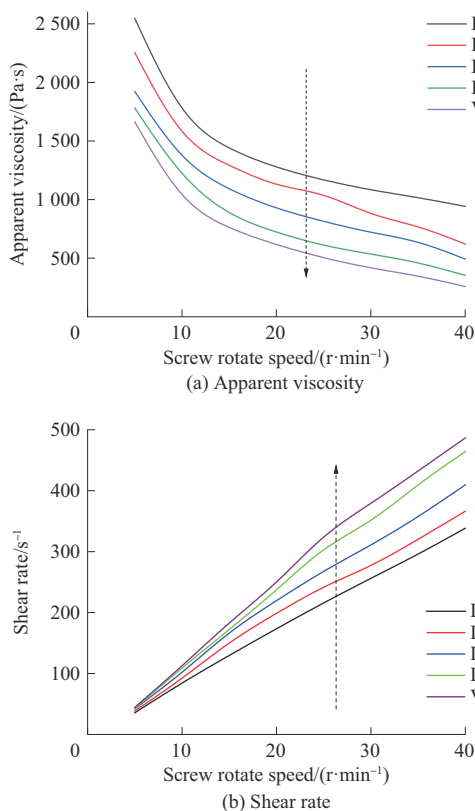


图 1 不同 SEPS 含量的 PE-LLD/SEPS 共混物流变性能

Fig. 1 Rheological properties of PE-LLD/SEPS blends with different SEPS contents

的熔体表观黏度逐渐降低,而剪切速率则相应提高。当螺杆转速为 40 r/min 且 SEPS 质量分数为 40% 时,PE-LLD/SEPS 共混物的熔体表观黏度为 $258.42\text{ Pa}\cdot\text{s}$,与纯 PE-LLD ($943.23\text{ Pa}\cdot\text{s}$) 相比降低了 72.60%,对应的剪切速率为 486.57 s^{-1} ,较纯 PE-LLD (338.37 s^{-1}) 提高了 43.80%;当保持 SEPS 质量分数一定时,随着螺杆转速的增加,PE-LLD/SEPS 共混物的剪切速率增大,而表观黏度减小,表现出明显的剪切变稀特性。因为随着螺杆转速的提升,螺杆的剪切作用增强,且 SEPS 分子链段的苯环结构会破坏并减弱 PE-LLD 分子间作用力,导致 PE-LLD/SEPS 共混物的表观黏度降低,使材料的流动性增加,改善了加工性能。

2.2 SEPS 对 PE-LLD/SEPS 共混物熔融结晶行为的影响

图 2 为不同 SEPS 含量的 PE-LLD/SEPS 共混物的熔融结晶 DSC 曲线,相关热力学数据列于表 2。由图 2 可知,PE-LLD/SEPS 共混物呈现单一的熔融峰和结晶峰,由于 SEPS 与 PE-LLD 均具有碳-碳长链段结构,基于相似相容性原理,两者在共混过程中碳-碳长链段相互渗透穿插形成良好的互熔,使 PE-LLD/SEPS 共混物呈现出单一的熔融温

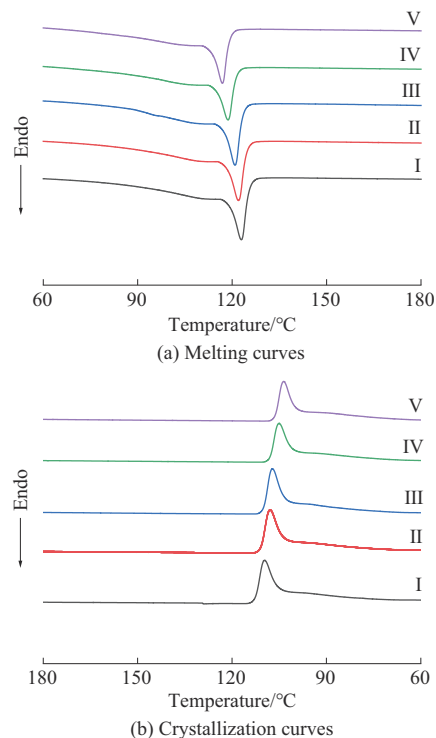


图 2 不同 SEPS 含量的 PE-LLD/SEPS 共混物的熔融结晶 DSC 曲线

Fig. 2 DSC curves of melting and crystallization of PE-LLD/SEPS blends with different SEPS contents

表2 不同SEPS含量的PE-LLD/SEPS共混物的DSC热力学数据

Tab. 2 DSC thermodynamic data of PE-LLD/SEPS blends with different SEPS contents

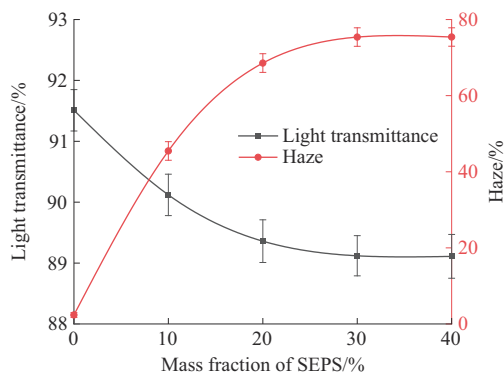
Samples	$T_m/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$\Delta H_c/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$X_c/\%$
I	123	110	88.6	81.4	30.24
II	122	108	80.5	76.3	27.47
III	121	107	73.2	71.4	24.98
IV	119	104	63.4	61.6	21.64
V	118	103	56.7	54.8	19.35

Notes: T_m is melting temperature; T_c is crystallization temperature; ΔH_m is melting enthalpy; ΔH_c is crystallization enthalpy; X_c is crystallinity.

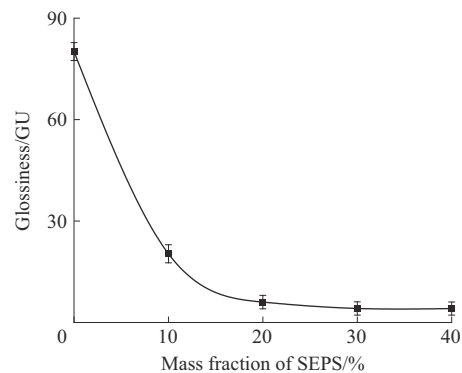
度(T_m)和结晶温度(T_c)。随着SEPS质量分数的增加,PE-LLD/SEPS共混物的 T_m 逐渐降低, T_c 逐渐向低温方向偏移,结合表2中的热力学数据,结晶度(X_c)伴随SEPS质量分数的增加呈现下降趋势。当SEPS质量分数达到40%时,PE-LLD/SEPS共混物的 T_m 为118 $^\circ\text{C}$, T_c 为103 $^\circ\text{C}$, X_c 为19.35%,与纯PE-LLD相比,分别降低5,7 $^\circ\text{C}$ 和10.89%。因为SEPS分子结构中苯环结构对PE-LLD规整性具有破坏作用,随着SEPS质量分数的增加,共混物中苯环结构数量增多,进一步削弱了PE-LLD分子间作用力和分子链的规整性。由于分子间作用力减小,受热时分子链的运动更为剧烈,且SEPS作为弹性体具有更低的熔点,因此PE-LLD/SEPS共混物的 T_m 降低;而分子链规整性受破坏致使PE-LLD/SEPS共混物结晶能力下降,所以 T_c 向低温方向偏移, X_c 降低。

2.3 SEPS对PE-LLD/SEPS共混物薄膜光学性能的影响

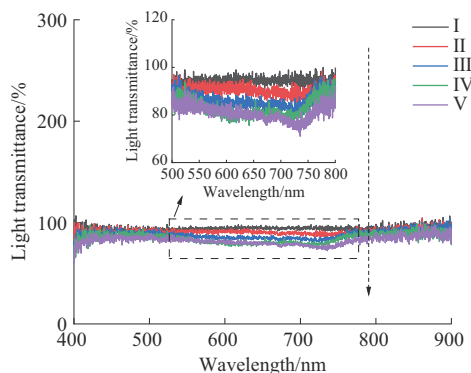
图3为不同SEPS含量的PE-LLD/SEPS共混物薄膜的光学性能。由图3a和3b可知,随着SEPS质量分数的增加,薄膜的雾度逐渐增大,而透光率和光泽度呈现逐渐减小的趋势。纯PE-LLD薄膜的透光率为91.51%,雾度为2.36%,光泽度为80.13 GU。当SEPS的质量分数达到20%时,共混物薄膜的透光率降至89.36%,较纯PE-LLD薄膜降低2.15%,雾度升至68.56%,较纯PE-LLD薄膜增加66.2%,光泽度降至6.04 GU,较纯PE-LLD薄膜降低了74.09 GU(即降低幅度约为92.46%),表现出显著的消光特性。当SEPS质量分数超过30%后,薄膜的透光率、雾度及光泽度趋于稳定,变化幅度较小,透光率仍在88%以上。采用光纤光谱仪测试薄膜在波长400~900 nm下的透光率(图3c),结果显示随着SEPS质量分数增加,薄膜在波长500~800 nm范围内的透光率



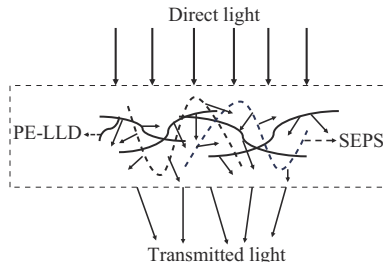
(a) Light transmittance and haze



(b) Glossiness



(c) Light transmittance at different wavelengths



(d) Schematic diagram of light transmission in PE-LLD/SEPS blend films

图3 不同SEPS含量的PE-LLD/SEPS共混物薄膜的光学性能

Fig. 3 Optical properties of PE-LLD/SEPS blend films with different SEPS contents

逐渐降低,结合图3d光线透过薄膜示意图,因为SEPS(折射率为1.567^[16])与PE-LLD(折射率为1.51^[17])的折射率不同,光线透过薄膜时,会在SEPS和PE-LLD之间发生多次折射和反射使穿过薄膜的

光通量减少,导致薄膜透光率降低、雾度升高,而雾度升高导致薄膜光泽度降低。

2.4 SEPS 对 PE-LLD/SEPS 共混物薄膜力学性能的影响

图4为不同SEPS含量的PE-LLD/SEPS共混物薄膜的力学性能(图4中MD为纵向,TD为横向)。由图4c-图4f可知,随着SEPS含量的增加,PE-LLD/SEPS共混物薄膜纵横向拉伸强度和断裂伸长率、耐穿刺强度及落镖冲击强度(即冲击破损质量)均呈现逐渐增大趋势,横向拉伸弹性模量先升高后降低,而纵向拉伸弹性模量呈逐渐降低趋势。当SEPS质量分数超过20%时,PE-LLD/SEPS共混物薄膜的拉伸强度、耐穿刺强度及落镖冲击强度提升趋于平缓,而断裂伸长率仍呈逐渐上升趋势。SEPS质量分数为20%时,PE-LLD/SEPS共混物薄膜的耐穿刺强度为12.73 N/mm,较纯PE-LLD薄膜(9.56 N/mm)提高了33.16%;落镖冲击强度为305 g,较纯PE-LLD薄膜(225 g)提升了35.56%;纵向拉伸强度为22.91 MPa,较纯PE薄膜(18.17 MPa)提高了26.09%;纵向断裂伸长率为1 866.84%,较纯PE-LLD薄膜(1 464.41%)增加了27.48%;横向拉伸强度为22.17 MPa,较纯PE-LLD薄膜(15.50 MPa)提高了

43.03%;横向断裂伸长率为1 666.42%,较纯PE薄膜(1 223.06%)提升了36.25%;纵向拉伸弹性模量为0.92 MPa,较纯PE-LLD薄膜(1.18 MPa)降低了22.03%,横向拉伸弹性模量为5.29 MPa,较纯PE-LLD薄膜(4.46 MPa)提高了18.61%。当SEPS质量分数超过30%时,薄膜的横向拉伸弹性模量开始呈降低趋势,而横向断裂伸长率增加幅度变大。

结合薄膜纵横向拉伸应力-应变曲线(图4a、图4b),由于流延工艺薄膜纵向受牵引力作用,分子链段发生取向行为,作为弹性体的SEPS引入则会减弱纵向的取向使薄膜纵向拉伸弹性模量降低;横向无取向行为,SEPS分子链中苯环结构限制PE-LLD分子链运动,导致薄膜横向拉伸弹性模量增加;SEPS质量分数过高($\geq 30\%$),SEPS结构中弹性链段发挥主要作用,导致横向拉伸弹性模量降低。但总体来看,薄膜在受到外力作用时,SEPS作为应力集中点,能够吸收并耗散大量能量,从而显著提升PE-LLD/SEPS共混物薄膜的拉伸强度、耐穿刺强度、落镖冲击强度及断裂伸长率。此外,当SEPS质量分数为10%~20%时,PE-LLD/SEPS共混物薄膜在纵横向拉伸强度上的差异较小,呈现较好的纵/横向拉伸强度均匀性。

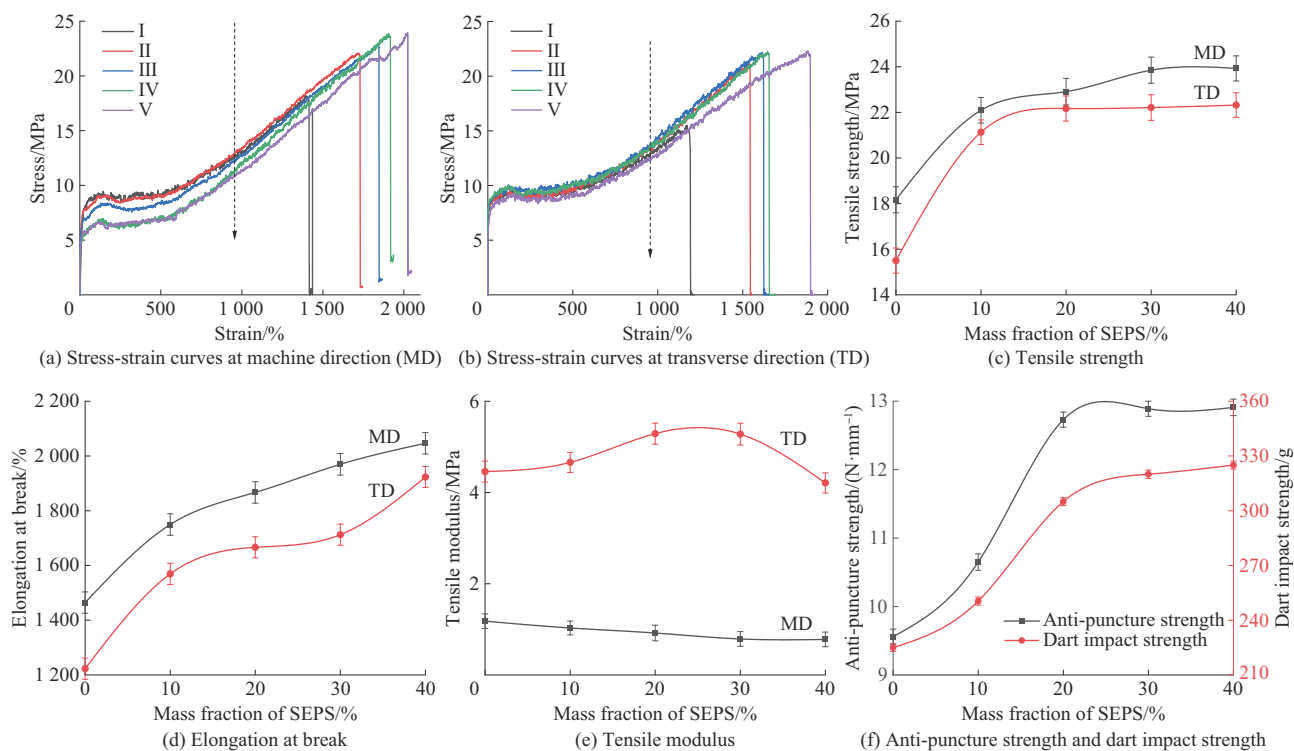


图4 不同SEPS含量的PE-LLD/SEPS共混物薄膜的力学性能

Fig. 4 Mechanical Properties of PE-LLD/SEPS blend films with different SEPS contents

2.5 PE-LLD/SEPS 共混物薄膜断面微观结构观察

图5为不同SEPS含量的PE-LLD/SEPS共混物薄膜断面微观形貌。从图5可以看出,试样I至试样V(图4a至图4e)的断面微观形貌均表现为韧性断裂。与纯PE-LLD相比,PE-LLD/SEPS共混物薄膜(图4b至图4e)的断面微观结构显示出更为显著的韧性特征。随着SEPS含量的增加,“韧窝”结构的尺寸逐渐增大且数量增多,同时伴随着大量银纹和剪切带的形成,韧性断裂特征愈发明显。SEPS属于苯乙烯类弹性体,与PE-LLD具有良好的相容性,以分散相的形式均匀分布于PE-LLD基体中。在外力作用下,SEPS弹性体粒子成为应力集中点,在拉伸或压缩过程中发生形变,产生大量银纹和剪切带,从而消耗能量。银纹、剪切带与弹性体粒子之间的相互作用形成了大量的“韧窝”,有效阻止了银纹和剪切带进一步发展为破坏性裂纹,显著提高了材料的韧性^[18]。

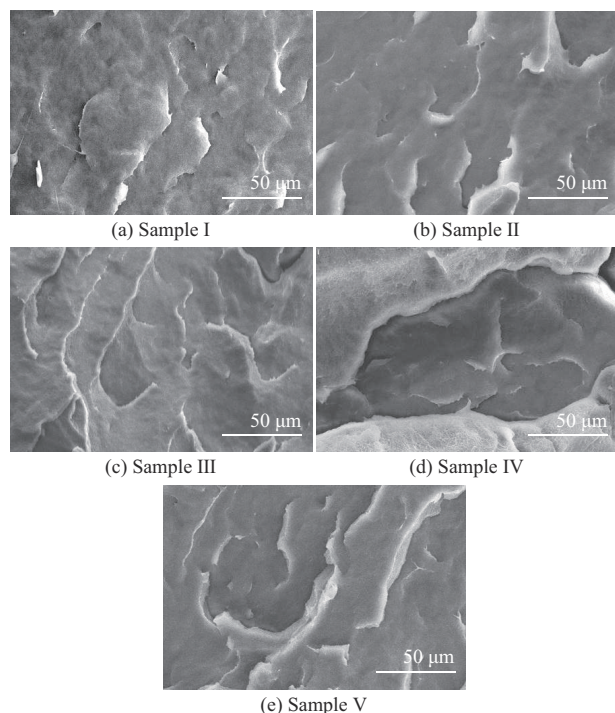


图5 不同SEPS含量的PE-LLD/SEPS共混物薄膜断面微观形貌

Fig. 5 Micro morphologies of cross-sections of PE-LLD/SEPS blend films with different SEPS contents

3 结论

利用弹性体SEPS共混改性PE-LLD并通过流延工艺制备PE-LLD/SEPS共混物消光薄膜,通过对PE-LLD/SEPS共混物流变性能、熔融结晶行为及相应薄膜的光学和力学性能等进行测试与表征,得出以下结论。

(1)SEPS可改善PE-LLD的加工、力学等性能,随着SEPS质量分数增加,共混物的表观黏度降低,薄膜的纵横向拉伸强度和断裂伸长率,以及耐穿刺强度和落镖冲击强度逐渐提高。

(2)PE-LLD/SEPS共混物呈现单一的熔融峰和结晶峰,两组分表现良好的相容性,随着SEPS质量分数增加,共混物的熔融温度、结晶温度和结晶度逐渐降低。

(3)随着SEPS质量分数增加,共混物薄膜的透光率和光泽度逐渐降低,雾度逐渐增加,但透光率仍然能保持88%以上。当SEPS的质量分数达到20%时,共混物薄膜的透光率为89.36%,雾度为68.56%,光泽度为6.04 GU,具有高透光率、高雾度和低光泽度的特点,展现良好的消光或哑光特性。

(4)当SEPS质量分数为10%~20%时,共混物薄膜在纵/横向拉伸强度上的差异较小,呈现较好的纵/横向拉伸强度均匀性。

参考文献

- [1] ZHONG X H, ZHAO X D, QIAN Y K, et al. Polyethylene plastic production process[J]. Insight-Material Science, 2018, 1(1). DOI: 10.18063/msmr.v1i1.504.
- [2] 唐虎,潘敬洪,向明.双向拉伸聚乙烯薄膜产业化发展现状与瓶颈及展望[J].高分子材料科学与工程,2021,37(7):177-182. TANG Hu, PAN Jinghong, XIANG Ming. Status quo, bottlenecks and prospects of the industrialization of biaxially oriented polyethylene film[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(7):177-182.
- [3] ZHANG H, XIE X C, DA L, et al. Analyzing long-period structural evolution of biaxially stretched ultra-high molecular weight polyethylene films[J]. Communications Materials, 2025, 6. DOI: 10.1038/s43246-025-00764-9.
- [4] 姚雪容,贾雪飞,苏萃,等.线型低密度聚乙烯三层共挤与单层流延膜的性能[J].石油化工,2023,52(4):485-492. YAO Xuerong, JIA Xuefei, SU Cui, et al. Properties of three-layer co-extruded linear low-density polyethylene cast films and corresponding single-layer films[J]. Petrochemical Technology, 2023, 52(4):485-492.
- [5] 韦丽明.中国多层共挤流延聚乙烯(CPE)包装薄膜产业发展现状与趋势的研究[J].塑料包装,2018,28(5):7-21. WEI Liming. Study on the development status and trend of multi-layer co-extrusion casting polyethylene packaging film industry in China[J]. Plastics Packaging, 2018, 28(5):7-21.
- [6] LI C, QIU X L, LU L X, et al. Preparation of low-density polyethylene film with quercetin and α -tocopherol loaded with mesoporous silica for synergetic-release antioxidant active packaging[J].

- Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(5). DOI: 10.1111/jfpe.13088.
- [7] 苏羽航, 林渊智, 毛健全, 等. PE/PP/微米 SiO₂ 消光热封膜的研制及其性能研究[J]. 中国塑料, 2025, 39(3):41–47.
- SU Yuhang, LIN Yuanzhi, MAO Jianquan, et al. Development and performance of PE/PP/micron SiO₂ matting and heat-sealing film [J]. China Plastics, 2025, 39(3):41–47.
- [8] MAHMOUD M E, EL-KHATIB A M, EL-SHARKAWY R M, et al. Design and testing of high-density polyethylene nanocomposites filled with lead oxide micro-and nano-particles: Mechanical, thermal, and morphological properties[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(31). DOI:10.1002/app.47812.
- [9] BAFNA A, BEAUCAGE G, MIRABELLA F, et al. Optical properties and orientation in polyethylene blown films[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2001, 39(23): 2 923 – 2 936.
- [10] FARSI B, MOHSENI M, ASIABAN S, et al. A study of polyethylene packaging films in presence of slip-agent and anti-block additives: A tale of surface and bulk crystallinities[J]. Polymer Engineering & Science, 2025, 65(4):1 800–1 817.
- [11] 郑萃, 姚雪容, 史颖, 等. 结晶高分子薄膜的内部和表面结构及光学性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(11):56–62.
- ZHENG Cui, YAO Xuerong, SHI Ying, et al. Internal structure, surface morphology and optical property of semicrystalline polymer films[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34(11):56–62.
- [12] QIAO R M, ZHONG Z P, LIU Q, et al. Effects of calcium sulfate whiskers on the mechanical properties and light transmittance of PE greenhouse films[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2160(1). DOI:10.1088/1742-6596/2160/1/012004.
- [13] ALI S, JI Y X, ZHANG Q L, et al. Preparation of polyethylene and ethylene/methacrylic acid copolymer blend films with tunable surface properties through manipulating processing parameters during film blowing[J]. Polymers, 2019, 11(10). DOI: 10.3390/polym11101565.
- [14] 王志春. HDPE/TPE 消光膜结构与性能的研究[J]. 塑料工业, 2018, 46(12):132–135.
- WANG Zhichun. Investigation on the structure and properties of HDPE/TPE films[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(12): 132–135.
- [15] 李薇, 程志刚, 聂萍, 等. 差示扫描量热法(DSC)测定全密度聚乙烯结晶度[J]. 中国建材科技, 2013, 22(1):37–41.
- LI Wei, CHENG Zhigang, NIE Ping, et al. Test the crystallinity of full-density polyethylene by differential scanning calorimetry (DSC)[J]. China Building Materials Science & Technology, 2013, 22(1):37–41.
- [16] HENDERSON J N. Styrene-butadiene rubbers[M]//Rubber Technology. Boston:Springer US, 1987:209–234.
- [17] WYPYCH G. Handbook of polymers[M]. Amsterdam: Elsevier, 2022.
- [18] NISAR J, MIR M S, VIVEK. Aging behavior characteristics of LDPE-SBS composite modified asphalt binder: A study of plasto-elastomeric composite[J]. Construction and Building Materials, 2025, 458. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2024.139506.