http://pmse.scu.edu.cn

高回弹与低收缩的共混改性聚乙烯单轴拉伸纤维丝

杨译灵[1]，龙 仁[2]，李学锋[1,2,3]，张高文[1,3]，黄以万[1,3]，龙世军[1,3]

（1. 湖北工业大学 材料与化学工程学院，湖北 武汉 430068；2. 湖北隆中实验室，湖北 襄阳 441000；
3. 湖北工业大学 绿色轻工材料湖北省重点实验室，湖北 武汉 430068）

摘要：聚乙烯（PE）挤出拉伸纤维丝作为人工草丝地毯，舒适柔软、弹性好，但其性能上还存在高回弹率与低收缩率之间相互矛盾的问题。文中研究了单轴拉伸线型低密度聚乙烯/双峰线型低密度聚乙烯/聚烯烃弹性体（LLDPE/BLLDPE/POE）共混物结构与性能之间的关系。单轴拉伸比λ=5时，与纤维丝广泛应用的改性树脂LLDPE/POE$_{\lambda5}$相比，LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$拉伸强度从43.6 MPa提高到81.9 MPa，临界缺陷长度从4.2 mm提升至9.9 mm，具有良好的力学性能。回弹率实验和收缩率实验表明，与LLDPE/POE$_{\lambda5}$相比，LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$在50 ℃时最终回弹率从69%提升到84%，80 ℃时100 min的收缩率从9.4%降低至5.5%，具有高回弹率与低收缩率。熔体拉伸测试表明，LLDPE/BLLDPE/POE的熔体拉伸应力达到410 kPa，熔体拉伸比达到10.3，具有良好的加工性能。该研究结果为通过聚合物共混开发高性能PE人造纤维丝提供了一种有效的思路与方法。

关键词：纤维丝；回弹率；收缩率；熔体拉伸比；双峰线型低密度聚乙烯
中图分类号：TQ342$^+$.61 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2025）05-0113-08

第三代人造草坪纤维丝主要由聚乙烯挤出纺丝制备，使人造草坪较前代纤维丝更加舒适柔软[1]。其中线型低密度聚乙烯（LLDPE）具有良好的力学性能和耐环境应力开裂性，并且与其它聚烯烃相容性良好。聚烯烃弹性体（POE）具有优异的拉伸和冲击强度，并与各种聚烯烃材料具有良好的相容性，是聚烯烃的良好改性剂[2]。在人造草坪的生产中，POE常用于改性LLDPE，使人造草坪的纤维丝具有良好的强度与韧性。单轴拉伸能使聚合物大分子链沿着拉伸方向取向排列，具有高度的各向异性，从而使材料的强度和刚度等力学性能沿分子链取向方向迅速增加[3]。固态^{13}C-NMR和X射线散射发现，单轴取向聚乙烯结晶区和非晶区都是高度定向的[4]。研究还发现，与丁烯m-LLDPE薄膜相比，辛烯m-LLDPE薄膜在取向固定后具有更高的撕裂强度，这是由于其具有更高的熔体拉伸比（V）[5]。在人造草坪纤维丝的生产过程中，常通过单轴拉伸取向提高其力学性能。

在生产与研究中还发现，纤维丝树脂分子链的刚性变强，可有效降低纤维丝的收缩率（S_h），但纤维丝的回弹率（D_r）会下降；回弹率越高，纤维丝的变形恢复能力越强，高的收缩率会在加工过程中使纤维丝的长度大幅缩短，降低纤维的利用率。当纤维丝树脂分子链的柔性提升时，回弹率会增加，但纤维丝的收缩率也会增加。纤维丝品质的重点指标高回弹率与低收缩率相互矛盾，这对制备高性能人造纤维丝具有较大的挑战[6]。当前对有效提升纤维丝回弹率与降低收缩率的研究还少见报道。

双峰线型低密度聚乙烯（BLLDPE）是相对分子质量分布呈2个峰的LLDPE树脂。BLLDPE既有高分子量短支链SCB部分提供力学强度，又有低分子量线型部分改善加工性能，因此具有良好的力学性能和可加工性[7]。与通用LLDPE相比，双峰LLDPE

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0082
收稿日期：2024-05-02
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52073083)；湖北隆中实验室自主创新项目(2022ZZ-16)
通讯联系人：李学锋，主要从事绿色轻质高分子材料改性与加工研究，E-mail: li_xf@mail.hbut.edu.cn

具有更快的结晶速率[8]。在低密度聚乙烯(LDPE)中加入BLLDPE进行共混改性，BLLDPE/LDPE共混物的拉伸强度和断裂伸长率明显提高[9]。

在本文中，将LLDPE、BLLDPE、POE熔融共混，并将其在95 ℃进行单轴拉伸，制备了单轴拉伸LLDPE/BLLDPE/POE共混物，利用BLLDPE中高分子量短支链SCB部分与低分子量线型部分与LLDPE及POE相互作用，改善共混物的加工性能与力学性能。讨论了共混物的拉伸行为、加工性能和结晶行为。还研究了单轴拉伸LLDPE/BLLDPE/POE共混物的回弹率与收缩率，并分析了单轴拉伸LLDPE/BLLDPE/POE共混物具有高熔体拉伸比，改性纤维丝具有高回弹率与低收缩率的机理。

1 实验部分

1.1 主要原料

LLDPE(7042)：密度0.918 g/cm^3，熔体指数2.0 g/10 min，中国石化广州分公司；双峰线型低密度聚乙烯(BLLDPE，FB2230)：密度0.923 g/cm^3，熔体指数0.9 g/10 min，奥地利北欧化工有限公司；POE弹性体(POE，LC 170)：密度0.870 g/cm^3，熔体指数1.1 g/10 min，韩国LG化学有限公司。

1.2 实验过程

1.2.1 共混物试样的制备：将LLDPE、BLLDPE和POE以85/10/5的质量比放入转矩流变仪(RM-200C，哈普电器技术有限责任公司)中熔融共混，温度170 ℃，螺杆转速35 r/min。将LLDPE/BLLDPE/POE共混物放入平板硫化机(YJ-46，成都航发液压工程有限公司)中，在170 ℃和10 MPa下液压成型，平板厚度(1±0.2)mm。LLDPE/POE共混物采用95/5的质量配比在相同工艺条件制备。

1.2.2 单轴拉伸样品的制备：使用带环境箱的万能拉力试验机(CMT4204，深圳美斯特)对LLDPE/BLLDPE/POE共混物进行预拉伸。单轴拉伸速率100 mm/min，环境箱温度95 ℃。单轴拉伸比由L_1/L_0定义，其中L_0是样品初始长度，25 mm；L_1是样品单轴拉伸后的长度。将试样命名为LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda x}$，其中x表示单轴拉伸倍数。采用相同方法制备LLDPE/POE$_{\lambda x}$。

1.3 测试与表征

1.3.1 拉伸性能测试：根据GB/T 10402-2006标准，使用万能拉伸试验机对样品的拉伸强度和断裂伸长率进行测试。拉伸速率100 mm/min。所有试样均为哑铃形样条，宽度4 mm、厚度1 mm。记录不同试样的应力-应变曲线。

1.3.2 断裂韧性测试：通过断裂力学预测缺陷敏感性断裂[10]。在万能拉伸试验机上进行缺口拉伸试验，所有样品均用刀片在样品中部进行预制裂纹缺口，初始裂纹(c)为样品中部宽度的0.1倍，缺口拉伸试验在25 ℃和1 mm/min下进行。比值Γ/W定义了材料的缺陷敏感性长度。拉伸功(W)是单位体积内所具有的能量，用于描述无缺口样品的断裂功，使用式(1)计算[11]

$$W=\int_1^{\lambda}\sigma \mathrm{d}\lambda \tag{1}$$

式中：λ——样品的单轴拉伸比；σ——断裂应力。

断裂能(Γ)用于表征大切口极限下的断裂，描述缺口样品单位面积的能量，使用式(2)计算

$$\Gamma=2\frac{3}{\sqrt{\lambda}}\,cW(\lambda) \tag{2}$$

1.3.3 回弹率测试：回弹率试验是将单轴拉伸样品一侧固定，然后在30 ~50 ℃烘箱中使用100 g砝码将样品的自由侧(长度15 mm)弯曲成90°，持续30 min。之后在相同温度移除砝码，如Fig.1所示。样品释放后在一定松弛时间(t，5 ~60 min)恢复的角度记录为φ_t。回弹率(D_r)使用式(3)计算[12]

$$D_r=\frac{\varphi_t}{90} \tag{3}$$

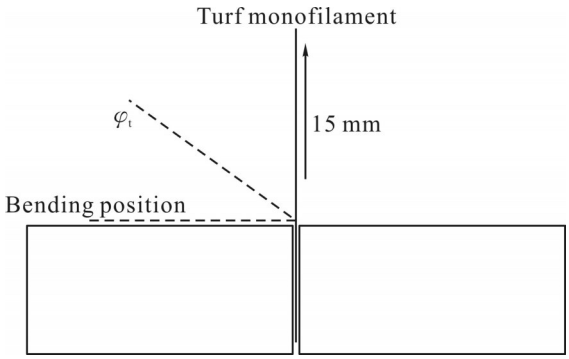


Fig. 1 Experimental schematic of the static bending experiment

1.3.4 收缩率测试：在烘箱中测试单轴拉伸样品的收缩性能。样品放入烘箱前长度为L_1，将其放入烘箱一段时间(20 ~100 min)后取出，20 ℃放置30 min，

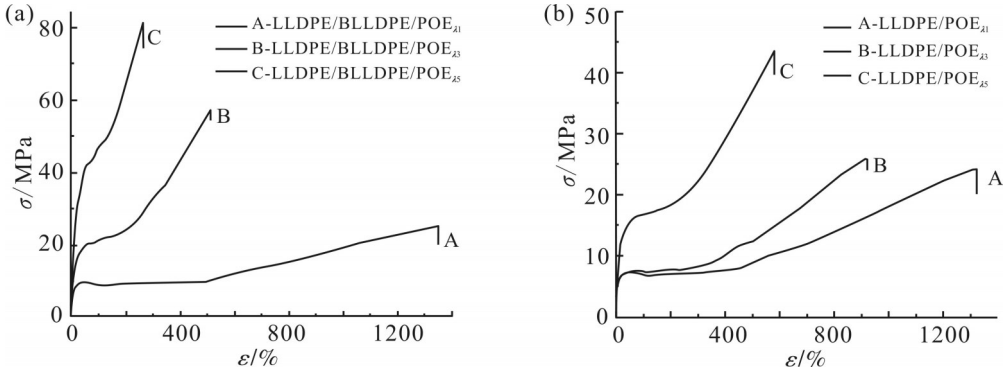


Fig. 2 Stress-strain curves of (a) LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda x}$ and (b) LLDPE/POE$_{\lambda x}$

测量其长度L_2。烘箱温度60~80 ℃。收缩率(S_h)通过式(4)计算:

$$S_h=(L_1-L_2)/L_1 \tag{4}$$

1.3.5 熔体拉伸流变性能测试:使用毛细管流变仪(GR-50,德国Gottfert公司)研究LLDPE/BLLDPE/POE共混物与LLDPE/POE共混物的剪切流变行为。剪切速率10~5000 s^{-1},温度150 ℃。使用电子显微镜观察不同剪切速率下LLDPE/BLLDPE/POE共混物与LLDPE/POE共混物的挤出物形貌。同时研究LLDPE/BLLDPE/POE共混物与LLDPE/POE共混物的拉伸流变行为。毛细管流变仪口模直径1 mm,长径比30/1,入口角度180°,温度150 ℃。柱塞移动速率0.5 mm/s。初始拉伸速率(V_s)40 mm/s,加速度(a)1.2 mm/s^2,拉伸速率(V_t,mm/s)按式(5)计算

$$V_t=V_s\times at \tag{5}$$

熔体拉伸比(V)为拉伸速率与挤出速率比值。熔体拉伸应力(σ_m,单位Pa)计算式见式(6)

$$\sigma_m=V\times\frac{F}{\pi R_0^2} \tag{6}$$

式中:V——熔体拉伸比;F——熔体拉伸力,N;R_0——口模半径,m。

1.3.6 结晶行为表征:使用激发波长为638 nm的Ar^+激发源的拉曼光谱仪(XploRA Plus,法国Horiba科学仪器公司)表征结晶度。在扫描过程中,波长测量范围600~2200 cm^{-1}。CH_2扭转区域的总积分强度(1250~1350 cm^{-1})与结晶度无关,用作内标。结晶相(C_R)的含量通过式(7)进行计算[13]

$$C_R=\frac{I_{1417}}{0.46\times I_{tw}} \tag{7}$$

式中:I_{1417}——样品在1417 cm^{-1}处的强度;I_{tw}——CH_2扭转区域的总积分强度(1250~1350 cm^{-1})。

使用X射线衍射仪(Empyrean,荷兰帕纳科仪器有限公司)研究样品的微观结构。测试电压45 kV,电流40 mA。小角X射线散射(SAXS)2θ范围0°~5°。SAXS试验中,相邻晶域之间的平均距离(d)使用式(8)计算

$$d=2\pi/q_{max} \tag{8}$$

式中:q_{max}——最大峰值强度时的散射矢量。广角X射线散射(WAXS)2θ范围5°~50°,WAXS试验中,垂直于(hkl)晶面的平均微晶尺寸(平均晶体尺寸,D)使用Scherrer公式计算

$$D=K\lambda_0/(\beta\cos\theta) \tag{9}$$

式中:K——常数,0.89;β——衍射峰半峰高宽(FWHM);λ_0——X射线波长,0.15418,nm;θ——布拉格角。同时计算了正交晶相与单斜晶相的含量[12]。

2 结果与讨论

2.1 LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda x}$纤维丝的力学性能

Fig.2为单轴拉伸后LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda x}$与LLDPE/POE$_{\lambda x}$纤维丝的力学性能。LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda 1}$的拉伸强度和断裂伸长率分别为25.4 MPa和1351%,LLDPE/POE$_{\lambda 1}$的拉伸强度和断裂伸长率分别为24.1 MPa和1321%,共混后带有BLLDPE的三元共混物与通用的二元共混物力学性能差别不大。而单轴拉伸5倍后,由于随着单轴拉伸比的增加,分子链沿拉伸方向取向更加完全,LLDPE/POE$_{\lambda 5}$的拉伸强度提升至43.6 MPa,而

LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$的拉伸强度提高到81.9 MPa，单轴拉伸后带有BLLDPE的三元共混物较通用的二元共混物拉伸强度提升了近1倍。后续除特别说明外，均优选单轴拉伸后带有BLLDPE的三元共混物LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$与通用的二元共混物LLDPE/POE$_{\lambda5}$进一步展开对比研究。

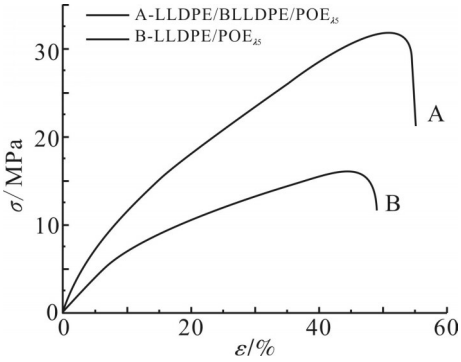


Fig. 3 Notch tensile curves of LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$ and LLDPE/POE$_{\lambda5}$

Fig.3为LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$与LLDPE/POE$_{\lambda5}$纤维丝的缺陷敏感性。结果表明，LLDPE/ BLLDPE/POE$_{\lambda5}$的缺陷敏感性与韧性均优于LLDPE/POE$_{\lambda5}$。LLDPE/POE$_{\lambda5}$的缺口拉伸强度为15.9 MPa；LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$由于分子链之间缠结更加紧密，并且分子链的排列更加有序，因此分子链更难断裂，缺口拉伸强度提高到31.9 MPa，与LLDPE/POE$_{\lambda5}$相比提高了近1倍。Tab.1计算了拉伸功、断裂韧性与临界缺陷长度(Γ/W)。W是表征材料韧性的重要参数，LLDPE/POE$_{\lambda5}$的W为11603 MJ/m^3，LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$增加到13807 MJ/m^3。Γ表征的是沿着裂纹方向的断裂韧性，LLDPE/POE$_{\lambda5}$的Γ为49.1 MJ/m^3，LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$的Γ增加至136.2 MJ/m^3，提高了近3倍。断裂韧性与断裂拉伸功之比定义为临界缺陷长度。LLDPE/POE$_{\lambda5}$的Γ/W为4.2 mm，LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$的Γ/W提升到9.9 mm，提高了1倍以上，代表材料从缺陷敏感断裂到缺陷不敏感断裂的过渡。

Fig.4为LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$与LLDPE/POE$_{\lambda5}$的回弹率。静态弯曲结果表明，LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$具有更高的回弹率，在相同温度时，LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$的最终D_r始终高于LLDPE/POE$_{\lambda5}$。在50 ℃时，LLDPE/POE$_{\lambda5}$在5 min内只能恢复51%，最终D_r为69%；LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda3}$在5 min内可以恢复到72%，最终D_r达到84%。

收缩率会影响人造草丝纤维的性能，高的收缩

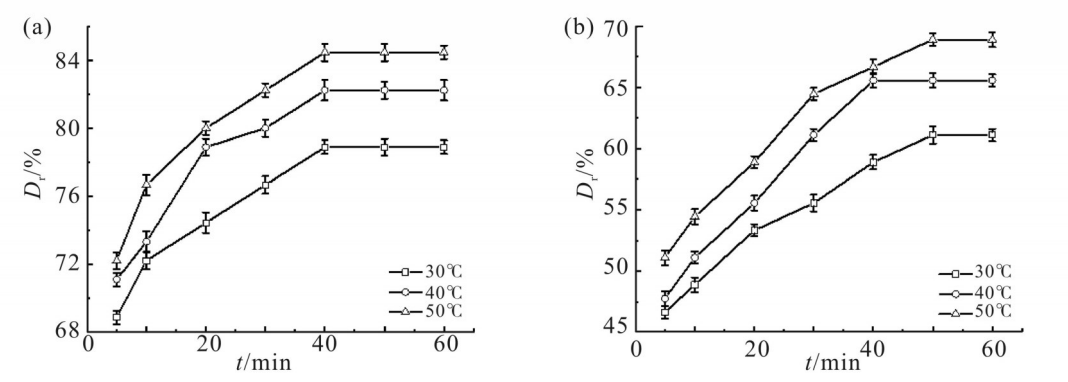


Fig. 4 D_r at different temperatures: (a) LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$; (b) LLDPE/POE$_{\lambda5}$. D_r: deformation recovery, for each filament was calculated using formula (3) after measuring the angle between the fibers and horizontal plate at different relaxation time: after 5~60 min, at 30~50 °C

Tab. 1 Work to rupture (W), fracture energy (Γ) and critical lengths (Γ/W) of LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$ and LLDPE/POE$_{\lambda5}$

Samples	W/(MJ·m^{-3})	Γ/(MJ·m^{-2})	(Γ/W)/mm
LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$	13807.6±400.1	136.2±8.3	9.9±1.2
LLDPE/POE$_{\lambda5}$	11603.4±180.5	49.1±1.8	4.2±0.2

W: rupture of an uncut sample; Γ: rupture in the limit of large cuts; Γ/W: ratio of these two material parameters defines a material-specific length

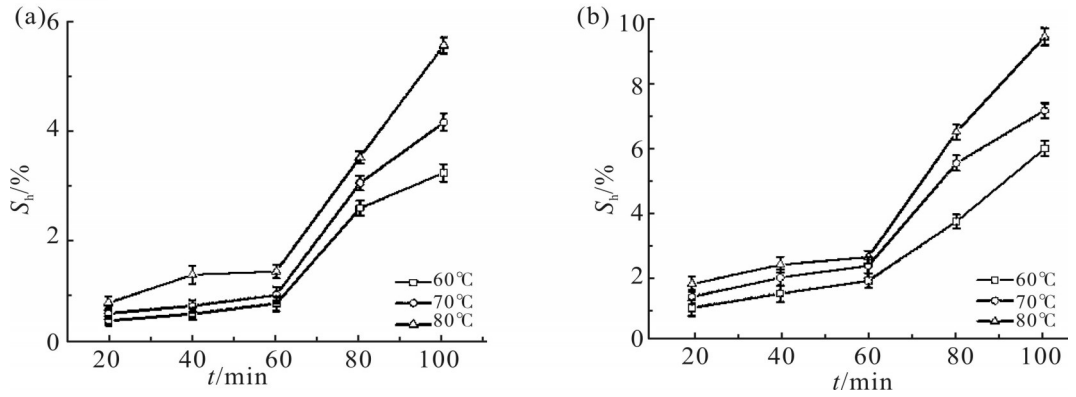


Fig. 5 S_h at different temperatures: (a) LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$; (b) LLDPE/POE$_{\lambda5}$. S_h: monofilaments before and after treating them on the oven freely for 20~100 min at 60~80 °C. After that, the percentage of shrinkage was calculated

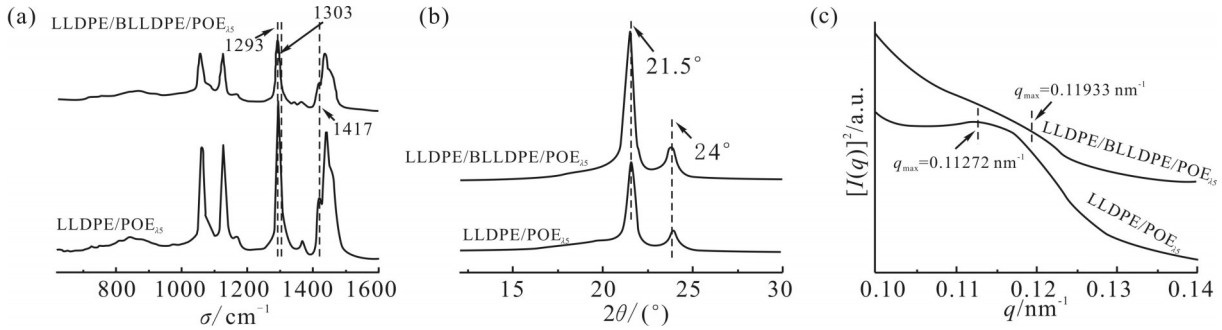


Fig. 6 (a) Raman spectra of LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$ and LLDPE/POE$_{\lambda5}$; (b) WAXS spectra of LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$ and LLDPE/POE$_{\lambda5}$; (c) SAXS profiles of LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$ and LLDPE/POE$_{\lambda5}$

Tab. 2 Average crystal size (D), average distance between adjacent crystalline domains (d), crystallinities with Raman method (C_R), monoclinic and orthorhombic crystallinities by XRD (M_c and O_c) of LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$ and LLDPE/POE$_{\lambda5}$

Samples	D/nm	d/nm	C_R/%	M_c/%	O_c/%
LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$	14.7±0.2	52.65±0.03	67.5±0.3	17.1±0.2	54.5±0.6
LLDPE/POE$_{\lambda5}$	3.8±0.1	56.67±0.05	59.6±0.4	15.5±0.1	45.6±0.7

率在加工过程中会使人造草丝纤维的长度大幅缩短,降低纤维的利用率,造成纤维丝的不均匀性缺陷。Fig.5为LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$与LLDPE/POE$_{\lambda5}$的收缩率。结果表明,LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$具有更低的收缩率。当温度为60 ℃时,20 min后LLDPE/POE$_{\lambda5}$的S_h为0.9%,而LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$的S_h仅为0.4%;100 min后LLDPE/POE$_{\lambda5}$的S_h从0.9%提升到5.9%,而LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$的S_h仅为3.1%。随着温度增加,收缩率逐渐变大。当温度为80 ℃时,100 min后LLDPE/POE$_{\lambda5}$的S_h达到9.4%;而LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$的S_h在100 min后仅为5.5%,收缩率降低了41%。

2.2 LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$纤维丝的结晶行为

为了更好地了解共混物的结晶形态,对LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$与LLDPE/POE$_{\lambda5}$进行了Raman和XRD测试,结果如Fig.6所示。平均晶体尺寸、相邻晶域之间的平均距离显示在Tab.2中。聚乙烯正交晶相的特征峰约为21.5°,对应于(110)晶面;单斜晶晶相特征峰约为24.0°,对应于(200)晶面[14]。LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$的D为14.7 nm,d为52.65 nm;LLDPE/POE$_{\lambda5}$的D为3.8 nm,d为56.67 nm(Fig.6(b, c))。与LLDPE/POE$_{\lambda5}$相比,LLDPE/BLLDPE/POE$_{\lambda5}$

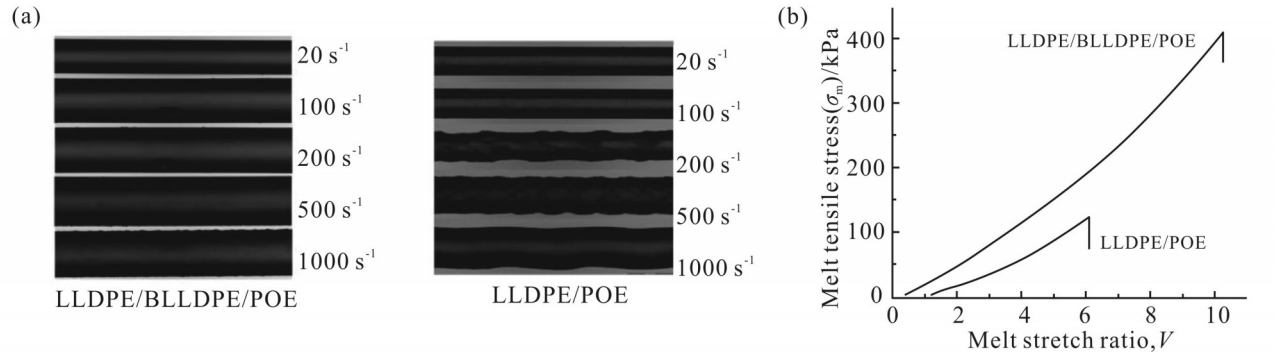


Fig. 7 (a) Morphologies of LLDPE/BLLDPE/POE and LLDPE/POE extrudates at different shear rates; (b) melt tensile properties of LLDPE/BLLDPE/POE and LLDPE/POE melts

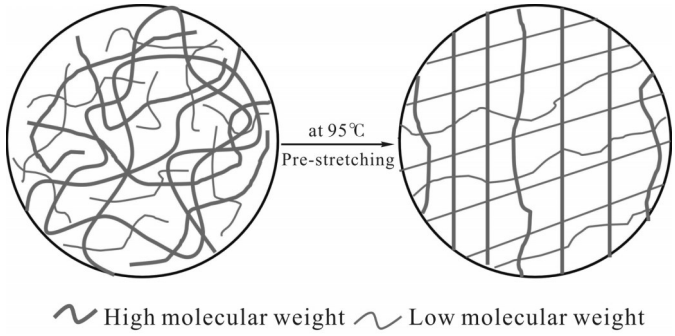


Fig. 8 Model inference of LLDPE/BLLDPE/POE before and after pre-stretching

具有更小的相邻晶域之间的平均距离和更大的平均晶体尺寸，表明单位体积内含有更多的取向晶体，LLDPE/ BLLDPE/$POE_{\lambda 5}$的结晶度更高。

如Fig.6(a)所示，所有样品都在900~1600 cm^{-1}的区域内显示出LLDPE的典型光谱特征，其中，1294 cm^{-1}，1308 cm^{-1}和1471 cm^{-1}分别对应于CH_2晶相、非晶相扭转振动峰和CH_2晶相弯曲振动峰[15]。Tab.2计算了对应的结晶度(C_R)，LLDPE/$POE_{\lambda 5}$的C_R为59.6%，LLDPE/BLLDPE/ $POE_{\lambda 5}$的C_R增加到67.5%。同时也计算了正交晶相与单斜晶相的含量(M_c和O_c)，LLDPE/BLLDPE/ $POE_{\lambda 5}$与LLDPE/$POE_{\lambda 5}$的M_c都在16%左右；LLDPE/$POE_{\lambda 5}$的O_c为45.6%，而LLDPE/BLLDPE/$POE_{\lambda 5}$的O_c提升到54.5%。XRD得到的结晶度趋势与Raman的趋势相同。结果表明，LLDPE/BLLDPE/$POE_{\lambda 5}$取向诱导结晶能形成更高的结晶度。

2.3 LLDPE/BLLDPE/POE熔体的流变性能

Fig.7(a)为不同剪切速率下LLDPE/BLLDPE/POE与LLDPE/POE挤出物形貌。20 s^{-1}时，LLDPE/BLLDPE/POE挤出物的表面十分光滑，在1000 s^{-1}时挤出物表面仍然比较光滑。而对于LLDPE/POE，当剪切速率为200 s^{-1}时就会出现周期性的螺纹变形，之后随着剪切速率增加，螺纹变形的周期逐渐变长。当剪切速率增加到1000 s^{-1}时，LLDPE/POE挤出物的形变程度最大。这表明，BLLDPE的加入可以稳定压力，抑制聚合物熔体在高剪切速率下的不稳定流动。

Fig.7(b)为LLDPE/BLLDPE/POE与LLDPE/POE的熔体拉伸性能。LLDPE/POE的熔体拉伸应力和熔体拉伸比仅为100 kPa和6.6，而LLDPE/BLLDPE/POE的熔体拉伸应力和熔体拉伸比分别达到410 kPa和10.3。在熔体拉伸过程中，单轴拉伸使LLDPE、POE与BLLDPE低分子量部分发生线性取向；同时BLLDPE高分子量SCB部分会在分子链之间形成物理缠结网络，从而使LLDPE/BLLDPE/POE的熔体拉伸性能优于LLDPE/POE。

BLLDPE分子量分布宽，低分子量的线型部分在单轴拉伸的过程中容易发生取向变形，LLDPE在单轴拉伸过程中也易发生取向变形，更容易发生分

子链的滑移,这种变形使LLDPE/BLLDPE/POE具有更大的回弹性,同时单轴拉伸取向诱导结晶又保证了LLDPE/BLLDPE/POE的高强度。BLLDPE高分子量的短支链SCB部分提供高熔体强度,保证了较低的收缩率。POE作为弹性体,极易拉伸取向变形,可以大幅提高熔体拉伸比,同时POE分子链的低结晶性使熵弹回复显著提高,也可以提升共混物的回弹性。并且BLLDPE高分子量的SCB部分由于更容易缠结,可以进一步提升共混物的回弹性。最终形成高熔体拉伸比、低收缩率与高回弹率兼备的单轴拉伸LLDPE/BLLDPE/POE纤维丝(Fig.8)。

3　结论

制备了单轴拉伸取向的LLDPE/BLLDPE/POE共混物,研究了LLDPE/BLLDPE/POE共混物的拉伸性能、缺陷敏感性、回弹性能、收缩性能与流变性能,讨论了性能与结构之间的关系。BLLDPE的高分子量部分提供高熔体拉伸应力和低收缩率;低分子量部分与LLDPE提供高回弹率,且高分子量部分通过缠结进一步提升回弹性;POE提供高熔体拉伸比和高回弹率,使LLDPE/BLLDPE/ POE共混物的熔体拉伸应力达到4.1×10^5 Pa,熔体拉伸比达到10.3。LLDPE/BLLDPE/$POE_{\lambda5}$在70 ℃时最终形变回复率达到88%,100 ℃时收缩率为10.5%。从而使LLDPE/BLLDPE/$POE_{\lambda5}$具有高熔体拉伸比、低收缩率的加工性能与纤维丝高力学性能的协同功能。为制备单轴取向后的高质量人造草坪材料提供参考。

参考文献:

[1] 王萌. 草丝纤维的结构与性能[J]. 纺织科技进展, 2016, 4(6): 8-10.
Wang M. Structure and property of grass fiber[J]. Progress in Textile Science & Technology, 2016, 4(6): 8-10.

[2] Zhang C, Zhang Y, Lu A, *et al.* Crystallization, phase and mechanical behaviors of linear low density polyethylene/ thermoplastic polyolefin elastomer blends[J]. Journal of Macromolecular Science, Part B, 2023, 62: 15-27.

[3] Wu F Y, Yang S, Lin H, *et al.* Enhanced melt-recrystallization process of propylene-ethylene copolymer during the uniaxial stretching with the aid of isotactic polypropylene[J]. Polymer, 2022, 239: 124443.

[4] Afeworki M, Brant P, Lustiger A, *et al.* Solid-state ^{13}C NMR and synchrotron SAXS/WAXS studies of uniaxially- oriented polyethylene[J]. Solid State Nuclear Magnetic Resonance, 2015, 72: 27-40.

[5] Ren Y, Shi Y, Yao X, *et al*. Different dependence of tear strength on film orientation of LLDPE made with different co-monomer [J]. Polymers, 2019, 11: 434.

[6] Sandkuehler P, Torres E, Allgeuer T. Polyolefin materials and technology in artificial turf I: yarn developments[J]. Sports Technology, 2010, 3: 52-58..

[7] Long C, Dong Z, Liu X, *et al*. Simultaneous enhancement in processability and mechanical properties of polyethylenes via tuning the molecular weight distribution from unimodal to bimodal shape[J]. Polymer, 2022, 258: 125287.

[8] Long C, Dong Z, Yu F, *et al.* Molecular weight distribution shape dependence of the crystallization kinetics of semicrystalline polymers based on linear unimodal and bimodal polyethylenes[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2023, 5: 2654-2663.

[9] 高俊刚, 于茂赏, 杨丽庭. 线性双峰聚乙烯/高压聚乙烯/线性低密度聚乙烯共混物的流变行为与力学性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2004, 20(1): 136-139.
Gao J G, Yu M S, Yang L T. Rheological behavior and mechanical properties of melt of LBPE/LDPE/LLDPE blends[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2004, 20(1): 136-139

[10] Rivlin R S, Thomas A G. Rupture of rubber. I. characteristic energy for tearing[J]. Journal of Polymer Science, 1953, 10: 291-318.

[11] Zhao J, Debertrand L, Narita T, *et al*. Fracture of dual crosslink gels with permanent and transient crosslinks: effect of the relaxation time of the transient crosslinks[J]. Journal of Rheology, 2022, 66: 1255-1266.

[12] Kolgjini B, Schoukens G, Kiekens P. Influence of stretching on the resilience of LLDPE monofilaments for application in artificial turf[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 124: 4081-4089.

[13] Strobl G R, Hagedorn W. Raman spectroscopic method for determining the crystallinity of polyethylene[J]. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 1978, 16: 1181-1193.

[14] Russell K E, Hunter B K, Heyding R D. Monoclinic polyethylene

revisited[J]. Polymer, 1997, 38: 1409-1414.

[15] Charitos I, Georgousis G, Klonos P A, *et al*. The synergistic effect on the thermomechanical and electrical properties of carbonaceous hybrid polymer nanocomposites[J]. Polymer Testing, 2021, 95: 107102.

Tensile and Processability of Bimodal Polyethylene-Modified Fibers with High Resilience and Low Shrinkage

Yiling Yang[1], Ren Long[2], Xuefeng Li[1,2,3], Gaowen Zhang[1,3], Yiwan Huang[1,3], Shijun Long[1,3]

(*1. School of Materials and Chemical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Hubei Longzhong Laboratory, Xiangyang 441000, China; 3. Hubei Provincial Key Laboratory of Green Light Industrial Materials, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China*)

ABSTRACT: As artificial grass silk carpets, polyethylene extruded and stretched filament is comfortable, soft and elastic, but its performance still has the problem of conflict between high resilience and low shrinkage. In this article, the relationship between the structure and properties of pre-stretched linear low density polyethylene/bimodal linear low density polyethylene/polyolefin elastomer (LLDPE/BLLDPE/POE) blends were investigated. When the pre-stretched ratio λ=5, the tensile strength of LLDPE/BLLDPE/$POE_{\lambda 5}$ increases from 43.6 MPa to 81.9 MPa, and the length of critical defects increases from 4.2 mm to 9.9 mm, which has good mechanical properties. The resilience experiment and shrinkage experiment show that compared with LLDPE/$POE_{\lambda 5}$, the final deformation recovery of LLDPE/BLLDPE/$POE_{\lambda 5}$ increases from 69% to 84% at 50 ℃, and the shrinkage of 100 min at 80 ℃ decreases from 9.4% to 5.5%, with a high resilience and low shrinkage. The melt tensile test results show that the melt tensile stress of LLDPE/BLLDPE/POE reaches 410 kPa, and the melt stretch ratio reaches 10.3, showing good processability. The results of this study provide an effective method for the development of high-performance modified PE rayon filaments.

Keywords: filament; resilience; shrinkage; melt stretch ratio; bimodal linear low density polyethylene