

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.036

DRP 温室透光覆盖材料性能表征研究

王宇欣¹ 李丹春¹ 黄 斌² 谢 鑫² 冯荣辉²

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 沐阳正中新材料有限公司, 宿迁 223800)

摘要:以聚酯(PET)有光切片和含有机助剂的母料为主要原料,经过结晶干燥、熔融挤出铸片、纵横向拉伸等工艺,研发了具有高保温、高透光、高强度、耐老化的可降解并循环再生聚酯(Degradable recyclable polyester, DRP)农用薄膜,简称 DRP 薄膜。使用分光光度计、万能试验机和热重分析仪等仪器,采用对比分析法对该 DRP 薄膜的透射性、保温性、抗拉性能、抗撕裂性能、热稳定性以及耐老化性能进行了表征研究。结果显示,DRP 薄膜在光合有效辐射波段透过率为 90.73%;在中波紫外、中红外波段透过率分别为 0.74%、14.56%,表明 DRP 薄膜有很强的阻隔中波紫外线能力以及优异的夜间保温能力。将覆盖于温室上自然老化约 1 年的 DRP 薄膜与初始 DRP 薄膜的光学性能进行对比,结果表明,自然老化的 DRP 薄膜在光合有效辐射波段透过率降低 3 个百分点,5~25 μm 波段红外阻隔能力降低 4.34 个百分点,说明自然老化的 DRP 薄膜仍然具有较好的透光率和很强的红外阻隔能力。DRP 薄膜纵向拉伸强度可达 103.21 MPa,可以满足正常使用要求。DRP 薄膜纵向裤形撕裂强度为 244.17 kN/m,是 PET 膜的 19.49 倍。在升温到 600℃的过程中,DRP 薄膜发生了 3 次较为明显的失重现象,首次失重温度为 250℃±5℃,可见其热稳定性较好。研究表明,DRP 温室透光覆盖材料在透光、保温、力学性能和耐老化方面都具有突出的优势。

关键词: DRP; 覆盖材料; 温室; 性能表征

中图分类号: S625 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)04-0320-08 OSID: 

Performance Characterization of DRP Greenhouse Transparent Covering Material

WANG Yuxin¹ LI Danchun¹ HUANG Bin² XIE Xin² FENG Ronghui²

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Shuyang Zhengzhong New Materials Co., Ltd., Suqian 223800, China)

Abstract: PET slices and masterbatch with organic synthetic additives were the main raw materials. Through crystallization drying, melt extrusion casting and longitudinal and transverse stretching, a degradable and recycled polyester agricultural film (DRP film) with high thermal insulation, high transparency, high strength and aging resistance was developed. The radiation transmittance, heat preservation ability, tensile properties, tear resistance, thermal stability and aging resistance of the DRP film were characterized by means of comparative analysis using spectrophotometer, universal testing machine and thermogravimetric analyzer. The results showed that the transmittance of DRP films in photosynthetic effective radiation wave range was 90.73%. The transmittance of ultraviolet radiation B and mid-infrared was 0.74% and 14.56%, respectively, which showed that DRP film had a good ability to resist the ultraviolet radiation B and the heat preservation at night. In addition, by comparing the radiation transmittance properties of DRP films aged naturally for about one year over the greenhouse with that of initial DRP films, it was found that DRP films aged naturally declined only 3 percentage points in photosynthetic effective radiation wave range, and it still had good light transmittance. The radiation transmittance of DRP film was decreased only by 4.34 percentage points in 5 000~25 000 nm after aging, and it still had good heat preservation ability as the film of greenhouse at night. The longitudinal tensile strength of DRP film was 103.21 MPa, which could meet the requirements of normal use. The longitudinal trouser tear strength of DRP film was 244.17 kN/m, which was 19.49 times of that of PET film. DRP film had three obvious weightlessness phenomena during the temperature rise to 600℃ in

收稿日期: 2019-11-28 修回日期: 2020-01-18

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD08B020107)和校企合作科技攻关项目(GZXCZH201811002)

作者简介: 王宇欣(1967—),男,副教授,主要从事农业生物环境与能源工程研究,E-mail: meller@163.com

thermogravimetric test. The first weightlessness temperature of DRP film was $(250 \pm 5)^\circ\text{C}$, and it had better thermal stability. In conclusion, the DRP greenhouse transparent cover material had outstanding advantages in light transmission, heat preservation, mechanical properties and aging resistance.

Key words: DRP; covering materials; greenhouse; performance characterization

0 引言

截止 2017 年,世界设施园艺达 460 万 hm^2 ,其中我国设施园艺面积达 370 万 hm^2 ,占世界设施园艺总面积的 80%,我国已经成为世界上设施园艺栽培面积最大的国家^[1]。目前,我国温室行业应用广泛的农用棚膜主要有聚烯烃(PO)薄膜、乙烯-醋酸乙酯共聚物(EVA)薄膜、聚乙烯(PE)薄膜和聚酯(PET)薄膜等。

透光覆盖材料是温室的重要组成部分,选择透光保温性能良好的棚膜有助于改善温室环境、提高作物产量和品质^[2]。文献[3-4]在冬季对结构相同的 PO 膜与 PE 膜日光温室内的温光环境进行监测,表明 PO 膜覆盖的温室具有升温快、保温好、温度高的特点,PO 膜温室中的草莓产量和品质优于对照 PE 膜温室。李胜战等^[5]对日产明净华涂层膜、国产国盾型 PE 膜和国产华盾型 PE 膜 3 种薄膜的光学性能进行了测试,结果显示,日产明净华涂层膜比国盾型棚膜和华盾型棚膜的红外辐射阻隔性能好,几乎可完全阻隔紫外有害辐射,在光合有效辐射 PAR 波段,明净华涂层膜 PAR 透射率达到 90%。EVA 型树脂具有较好的保温透光性能,王楠等^[6]对多种厚度的 PE 和 EVA 透光覆盖材料在 300~2 500 nm 波长范围的分光透过率进行了测试,发现不同厚度的 EVA 膜透过率相近,且均高于 PE 膜。李永勃等^[7]将 EVA 型树脂加入 PO 膜中,研制出 EVA 型高保温复合膜,研究发现,由于 EVA 的存在,其保温性能、透光性能都比普通 PO 膜有所提高。李衍素等^[8]在探究 PO 膜和 EVA 膜在设施黄瓜生产中的应用效果时发现,EVA 膜温室光照强度、温度及产量都低于 PO 膜温室。蒋学勤等^[9]对新研发的纳米转光膜与 PO 膜进行了对比,发现 PO 膜温室不仅气温和光照强度比纳米转光膜略低,并且番茄果实产量也比纳米转光膜温室低 12.34%。王宇欣等^[10]对 PET 膜的各项性能分析表明,PET 膜具有良好的物理性能、化学性能和耐久性能等,可以大幅度提高温室保温能力和透光能力,但是 PET 薄膜存在缺口易撕裂、影响正常使用的缺点。FADEL 等^[11]在实验室测试了聚碳酸酯板、玻璃纤维板和有机玻璃的隔热和透射率,结果表明,聚碳酸酯在隔热和光透射率方面与有机玻璃相当,比玻璃纤维更好,但是存在生

产工序复杂,成本较高的缺点。此外,刘建等^[12]研究发现,强紫外线照射容易导致薄膜老化、机械性能下降,影响正常使用,卡簧卡槽的夹持也会加速薄膜老化。KAVGA 等^[13]对以二氧化钛与低密度聚乙烯为主要成分的温室覆盖材料进行了环境性能和力学性能测试,结果显示,此种材料对亚热带条件下温室的隔热性能有所改善,与对照材料相比,其弹性模量和硬度分别增加了 80% 和 32.9%。XIE 等^[14]为了解决炎热地区日光温室内夏季温度过高的问题,研发了一种由氧化铟锡和金属材料组成的太阳能覆盖材料,这种材料可见光的透过率大于 95%,而近红外反射率在 90% 以上,可以有效解决夏季高温地区日光温室存在的问题。

目前,我国农膜的生产和使用量极大,废旧农膜对农业生态环境造成的影响也日益突出^[15]。虽然很多农膜可回收再利用,但仍存在薄膜回收降解成本高、降解再生产性能远低于原材料等问题。本文以聚对苯二甲酸乙二醇酯为母料,研发可循环再生的聚酯(Degradable recyclable polyester, DRP)农用薄膜,简称 DRP 薄膜。对该 DRP 薄膜的透射性、保温性、抗拉性能、抗撕裂性能、热稳定性以及耐老化等性能的表征进行研究,以解决目前我国设施园艺对优质温室棚膜的需求。

1 DRP 薄膜生产工艺

采用五釜工艺生产母料聚对苯二甲酸乙二醇酯,简称聚酯。聚酯中添加特有的有机合成添加剂,以改善薄膜的透光、保温、抗老化以及延展性等性能。然后,对其进行预结晶和干燥,干燥工艺采用热风法,降低聚酯切片中所含有的水分。采用急冷辊、骤冷的方式对其进行熔融挤出铸片,以抑制结晶的生长,提高聚脂薄膜的成膜性。最后对厚片采用特有的双向拉伸薄膜生产工艺,先进行纵向拉伸再进行横向拉伸,最终制造出 DRP 薄膜,如图 1 所示。

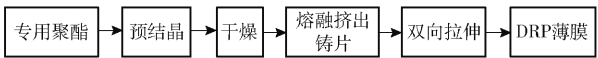


图 1 DRP 薄膜生产工艺流程图

Fig. 1 DRP film production process flow chart

2 材料与方法

2.1 材料

新的薄膜:厚 0.12 mm 的 DRP 薄膜、厚 0.12 mm

的 PET 薄膜、厚 0.12 mm 的明净华 PO 膜和厚 0.12 mm 的 PE 膜。自然老化薄膜:自然老化约 1 年厚 0.12 mm 的 DRP 薄膜。

DRP 薄膜自然老化试验在山东省寿光市蔬菜集团农业园区中进行。从 2018 年秋季开始将 DRP 薄膜覆盖于试验温室上进行约 1 年的自然老化试验。试验区内一年的平均气温为 13.8℃, 极端最高气温为 37.4℃, 极端最低气温为 -15.6℃, 平均降水量为 593.8 mm, 平均相对湿度为 66%。

所有塑料薄膜试样在试验前均在温度 $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $(50 \pm 5)\%$ 的环境下状态调节不少于 4 h。

2.2 方法

2.2.1 紫外-可见光-近红外透射率

试验使用日本岛津公司生产的 UV-3150 型紫外可见分光光度计(波长范围为 190~3 200 nm, 最小采样间隔为 0.1 nm)。试验环境温度为 $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为 $(50 \pm 5)\%$ 。将仪器和 UV-Probe 软件开启后,待仪器自检完成,设置波长范围为 190~2 500 nm,扫描速度为中速,采样间隔为 2 nm,测量模式为 Transmittance。设置完成后,样品架不放置样品,点击 Baseline 进行基线校正,然后将 50 mm ×

50 mm 薄膜样品放入样品架,开始试验,试验完成后,保存数据。每种薄膜取 3 个试样进行上述试验,分别计算平均值作为其最终结果。

2.2.2 5~25 μm 红外谱线透射率

试验使用日本岛津公司生产的 FTIR-8400S 型傅里叶变换红外分光光度计(扫描次数为 1~400, 波数范围为 $400 \sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$)。试验环境温度为 $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为 $(50 \pm 5)\%$ 。开启仪器和 IRsolution 软件,设置为透射率测量模式,扫描次数为 10,分辨率为 4.0 cm^{-1} ,波数范围为 $40 \sim 200\text{ cm}^{-1}$ 。设置完成后,先进行背景扫描,然后将 25 mm × 50 mm 的薄膜试样放到样品架上,点击样品按钮进行扫描,扫描完成后,保存数据。每种薄膜取 3 个试样进行上述试验,分别计算平均值作为其最终结果。

2.2.3 力学性能

(1)按照国家标准:塑料拉伸性能测定(GB/T 1040.3—2006)^[16]、塑料直角撕裂性能试验方法(QB/T 1130—1991)^[17]、塑料薄膜和薄片耐撕裂性能的测定第 1 部分:裤形撕裂法 GB/T 16578.1—2008^[18]的规定,将塑料薄膜冲切为图 2 所示试样,确保试样边缘光滑且无缺口,每种薄膜制备 5 个试样。

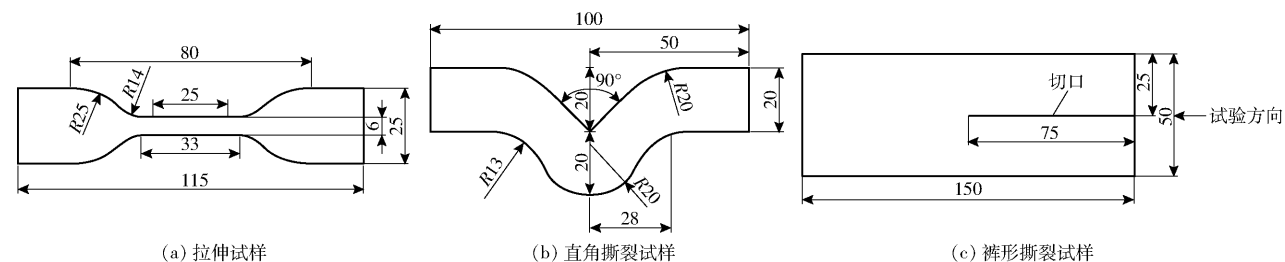


图 2 拉伸撕裂试样规格(单位:mm)

Fig. 2 Specification drawings of tensile tear specimen

(2)塑料拉伸强度试验:试验使用 WDW-10E 型微机控制电子万能试验机(试验力精度为 0.1 N, 变形量精度为 0.001 mm,时间精度为 0.1 s)。试验环境温度为 $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$,湿度为 $(50 \pm 5)\%$ 。首先将 SmartText 软件与万能试验机联机,调节试验机横梁到适当位置,将试样固定于夹具上,试验类型选择“塑料拉伸性能的测定(GB/T 1040.3—2006)”,选择图像模式为应力-应变图,输入试样的厚度为 0.12 mm,标距为 25 mm,按照 GB/T 1040.3—2006 的规定,拉伸速度设置为 100 mm/min,将仪器试验力、位移和时间数据置零,开始试验,待试样撕裂后,点击结束回位按钮,保存数据。每种类型薄膜试验 5 次,分别计算平均值作为其结果^[19]。

(3)直角撕裂强度试验和裤形撕裂强度试验:

与上述塑料拉伸强度试验方法相同,标准参考 QB/T 1130—1991 和 GB/T 16578.1—2008,拉伸速度均设置为 200 mm/min。

2.2.4 热稳定性

试验使用 TGA-101 型热重分析仪(温分辨率 0.1℃,灵敏度 0.01 mg,温度波动 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,升温速率 1~80℃/min)。在试验开始前 3 h 将仪器通电并且控制室内温度为 $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$,称量并设置坩埚质量为 10 mg,试验条件为空气氛围,升温速度为 20℃/min,温度升至 600℃。将薄膜切碎,取 4 mg 放置于坩埚中,用镊子缓慢将坩埚放置于炉体内的样品托盘上,盖上炉体盖,开始试验,待试验结束后导出数据,重复上述步骤对下一种薄膜进行试验,直到试验完成。

3 结果与分析

3.1 光学性能表征

3.1.1 紫外-可见光-近红外透过率

图3为4种薄膜紫外-可见光-近红外透射谱线图。由图3可知,在波段190~400 nm DRP膜透过率最低;在波段400~2 500 nm中,DRP薄膜的透过率和其他三者相比基本处于中间位置。为了精确得知4种薄膜在各波段辐射的平均透过率,需依据GB/T 2680—94^[20]中的计算方法进行计算。

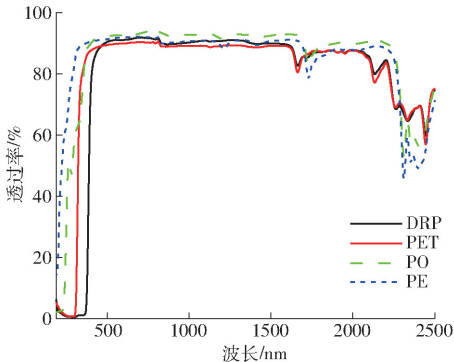


图3 DRP、PET、PO 和 PE 薄膜在波段190~2 500 nm 内的透过率曲线

Fig. 3 Transmittance of DRP, PET, PO and PE films at 190~2 500 nm wave range

紫外透过率计算式为

τ_s = (∑_{λ=300}³²⁰ τ(λ) S_λ Δλ) / (∑_{λ=300}³²⁰ S_λ Δλ) × 100% (1)

τ_{s'} = (∑_{λ=320}³⁸⁰ τ(λ) S_λ Δλ) / (∑_{λ=320}³⁸⁰ S_λ Δλ) × 100% (2)

式中 S_λ——紫外辐射相对光谱分布,W/(m²·nm)
τ(λ)——分光透过率,%
Δλ——波长间隔,nm
τ_s——UV-B 波段透过率,%
τ_{s'}——UV-A 波段透过率,%

PAR 透过率是基于植物响应下的太阳光波段400~700 nm 范围内的辐射透过率,与作物对光的响应程度有关。PAR 透过率τ_p 计算式为

τ_p = (∑_{λ=400}⁷⁰⁰ τ(λ) S_λ D_λ) / (∑_{λ=400}⁷⁰⁰ S_λ D_λ) × 100% (3)

式中 S_λ——太阳光辐射相对光谱分布,W/(m²·nm)
D_λ——相应波长上的光谱辐射权重系数,即光谱响应敏感系数

作物对太阳光谱响应的敏感程度并不均一,而是呈现2个峰值,分别在440、620 nm处,而在400 nm以下和670 nm以上敏感程度急剧下降,所以用植物响应系数计算材料的透光特性很有意义^[21],将植物响应系数记为D_{λ_p};STIJGER^[22]研究认为,可见光中各波长的辐射对植物的光合作用都有重要影响,如透过覆盖材料进入温室内没有参与光合作用的蓝光对作物品质改善有重要影响,将这时权重系数记为D_{λ₁} = 1。使用两种权重系数进行计算,结果如表1所示。

表1 DRP、PET、PO 和 PE 薄膜波段400~700 nm 透过率

Tab. 1 Light transmittance of DRP, PET, PO and PE films at 400~700 nm wave range				%
权重系数	DRP	PET	PO	PE
D _{λ_p}	90.73	89.65	92.50	91.56
D _{λ₁}	90.56	89.60	92.48	91.52

可见光透过率是在波段380~780 nm范围内的透过率,计算式为

τ_{p'} = (∑_{λ=380}⁷⁸⁰ τ(λ) S_λ Δλ) / (∑_{λ=380}⁷⁸⁰ S_λ Δλ) × 100% (4)

近红外透过率τ_{s''} 计算式为

τ_{s''} = (∑_{λ=780}²⁵⁰⁰ τ(λ) S_λ Δλ) / (∑_{λ=780}²⁵⁰⁰ S_λ Δλ) × 100% (5)

式(1)、(2)、(4)、(5)计算得到的各种材料在不同波段的透过率如表2所示。

表2 DRP、PET、PO 和 PE 薄膜各波段透过率

Tab. 2 Transmittance of DRP, PET, PO and PE films at different wavelength				%
薄膜类型	波段			
	300~320 nm	320~380 nm	380~780 nm	780~2 500 nm
DRP	0.74	2.51	88.40	88.95
PET	1.01	78.19	89.59	87.88
PO	61.32	77.04	92.55	91.41
PE	87.50	89.56	91.65	89.12

注:数据均为直射光的透射情况。

光环境是影响作物生长的重要因素^[23]。在太阳光谱中,300 nm以下的波段对人和植物危害极大,但是基本被臭氧层阻隔,并不会对人们造成危害。300~320 nm波段为UV-B波段,该波段透过率容易造成植株矮化、叶面积降低和光合速率降低等危害,过低的UV-B透过率容易影响植物色素合成^[24],DRP薄膜在该波段的透过率仅为0.74%,

比 PET 略低,比 PO 膜低近 60 个百分点,比 PE 膜低近 87 个百分点,可见 PET 材料阻隔 UV - B 的能力较强,改性后的 PET 材料 DRP 膜对 UV - B 波段的阻隔能力略有增强。波段 320 ~ 380 nm 为 UV - A 波段,相关研究表明该波段的紫外线对植物的生长既有危害也有促进作用,辐射过多会对植物产生类似 UV - B 波段的危害,但是适量的 UV - A 辐射会促进植物生长,促进蛋白质、糖、酸类的合成,增加种子发芽率,还能提高植物抗病能力。DRP 薄膜在该波段的透过率为 2.51%,而 PET 和 PO 膜的透过率基本相同,分别为 78.19% 和 77.04%,PE 膜透过率最高为 89.56%。所以 DRP 薄膜在阻隔紫外光方面的能力远强于其他 3 种膜。380 ~ 780 nm 波段为可见光波段,DRP 薄膜在该波段透过率为 88.40%,比 PET 略低,比 PO 膜低 4.15 个百分点,比 PE 膜低 3.25 个百分点,从图 3 可以看到,此种差距主要是由于 DRP 薄膜在靠近紫外波段的透过率极低所引起的。在可见光波段中 400 ~ 700 nm 波段为植物光合有效辐射(PAR)波段,对植物的光合作用有较大影响。使用植物对光敏感系数以及常数 1 分别对 PAR 波段的透过率进行了计算(表 1)。从表 1 可知,两种权重系数下光的透过率基本相同,与丁小明等^[25]研究结果一致,但按照植物对光敏感系数计算的结果比常数 1 略高。在 PAR 波段中,透过率由大到小为 PO 膜、PE 膜、DRP 膜、PET 膜,且 DRP 膜透过率仅比明净华 PO 膜低 1.77 个百分点,因此 DRP 膜在光合有效辐射波段具有较好的透光率。780 ~ 2 500 nm 波段为近红外波段,该波段透过率高不仅可以提高温室内部的温度还可以促进植物生长。该波段透过率由大到小为 PO 膜、PE 膜、DRP 膜、PET 膜,PO 膜比 DRP 膜高 2.46 个百分点,在 780 ~ 2 500 nm 波段 DRP 薄膜透过率较好。

3.1.2 5 ~ 25 μm 红外透过率

相关研究表明,冬季温室夜间热量散失主要依靠辐射散热,保持温室内作物正常生长的适宜温度为 15℃,此时热辐射能量有 80.74% 集中在 5 000 ~ 25 000 nm 波段^[26],因此光谱范围取为 5 000 ~ 25 000 nm。

图 4 为 4 种薄膜的红外透射谱线。从图 4 可知,在 5 000 ~ 25 000 nm 波段范围内 DRP 膜的透射率最低,PE 膜最高。为了精确对比 4 种薄膜在该波段的透过率,对 5 000 ~ 25 000 nm 波段范围内透过率做简单的均值计算(意义是假设全投射为 1 的情况下,实际投射谱线下面积的积分和均值)如表 3 所示。

从表 3 可看出,在波段 5 000 ~ 25 000 nm 范围

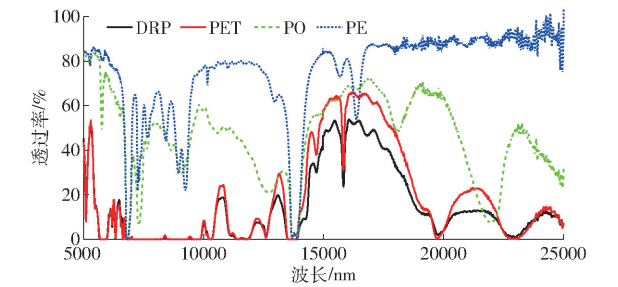


图 4 DRP、PET、PO 和 PE 薄膜在波段 5 000 ~ 25 000 nm 的透过率

Fig. 4 Transmittance curves of DRP, PET, PO and PE films at 5 000 ~ 25 000 nm wave range

表 3 DRP、PET 和 PO 薄膜在波段 5 000 ~ 25 000 nm 透过率

5 000 ~ 25 000 nm wave range				%
薄膜种类	DRP	PET	PO	PE
透过率	14.56	18.69	46.59	74.99

内红外透过率由小到大为 DRP 薄膜、PET 薄膜、PO 薄膜、PE 薄膜,DRP 薄膜在波段 5 000 ~ 25 000 nm 的透过率仅为 14.56%,可见其红外阻隔能力很强,比明净华 PO 膜的红外透过率低 32.03 个百分点。因此,DRP 薄膜可以有效地阻隔温室内部的热量散失,在夜间具有很好的保温效果。

3.1.3 DRP 薄膜自然老化后光学性能

自然老化的 DRP 薄膜与初始 DRP 薄膜的光学性能表征结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,老化后的 DRP 薄膜在 190 ~ 2 500 nm 波段透过率仅发生微小衰退。在 5 000 ~ 25 000 nm 波段也发生微小衰退,但比 190 ~ 2 500 nm 波段衰退略大。为了更加准确对比两者的变化情况,各波段 DRP 老化前后的透过率如表 4 所示。

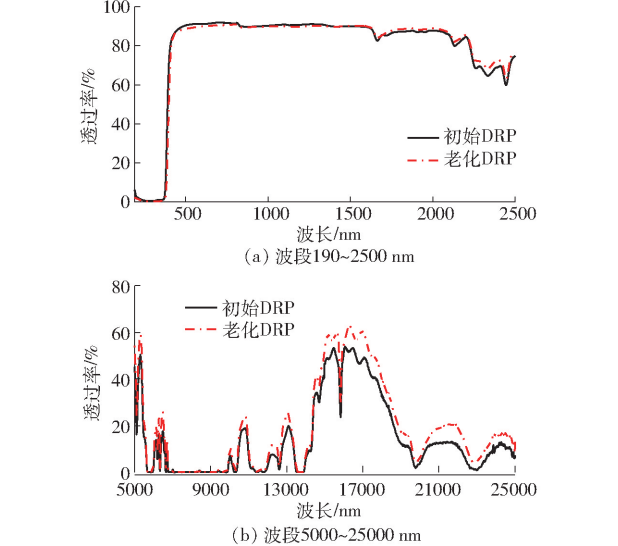


图 5 DRP 薄膜老化前后透过率曲线

Fig. 5 Transmittance curves of DRP films before and after aging

表 4 DRP 老化前后透过率比较

Tab. 4 Comparison of transmittance of DRP films before and after aging %

项目	波段			
	300 ~ 320 nm	400 ~ 700 nm	780 ~ 2 500 nm	5 000 ~ 25 000 nm
初始 DRP	0. 74	90. 73	88. 95	14. 56
老化 DRP	0. 41	87. 73	88. 78	18. 90

从表 4 可知,老化后的 DRP 薄膜在 300 ~ 320 nm 和 780 ~ 2 500 nm 波段透过率分别减少 0. 33 个百分点和 0. 17 个百分点,基本没有明显变化,说明在自然老化的 DRP 薄膜阻隔 UV - B 的能力比初始状态的 DRP 薄膜略微增强,且仍比其他 3 种薄膜的初始状态下强。在 780 ~ 2 500 nm 波段中,老化后的 DRP 薄膜透过率比初始的 PET 薄膜略高。在 400 ~ 700 nm 波段中,老化后的 DRP 薄膜透过率为 87. 73%,衰退了 3 个百分点,比较接近初始的 PET 薄膜在该波段的透过率。在 5 ~ 25 μm 波段中,老化

后的 DRP 薄膜红外阻隔能力降低了 4. 34 个百分点,为 18. 90%,仍比初始的 PO、PET 和 PE 膜红外阻隔能力强,对于温室的保温效果显著。

3. 2 力学性能表征

3. 2. 1 4 种薄膜拉伸和直角撕裂强度

从图 6a 可以看出,DRP 薄膜的横向、纵向拉伸强度分别为 96. 52、103. 21 MPa,都比 PET 低,但其仍明显高于明净华 PO 膜和 PE 膜。断裂时的应变率也称断裂伸长率,从应变可以看出,DRP 薄膜的断裂伸长率最低,PE 和 PO 膜的断裂伸长率较大。

从图 6b 可以看出,DRP 薄膜的纵、横向直角撕裂强度分别为 401. 5、323. 17 kN/m,比 PET 薄膜低,但高于 PO 和 PE 膜。

塑料薄膜的纵向拉伸撕裂强度一般大于横向拉伸撕裂强度,DRP 薄膜在拉伸撕裂强度方面表现良好,可以满足作为温室覆盖材料的要求。

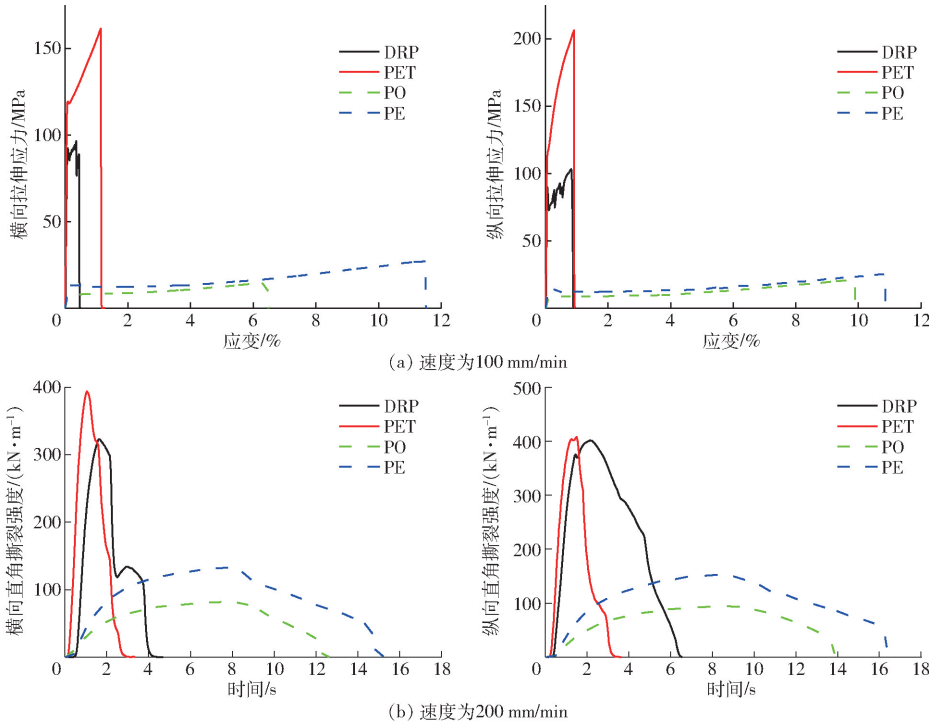


Fig. 6 Stretching and tearing curves of DRP, PET, PO and PE film

3. 2. 2 DRP 与 PET 裤形撕裂强度

图 7 为速度 200 mm/min 时 DRP 和 PET 的裤形撕裂强度比较。由图 7 可知,DRP 薄膜的纵、横向裤形撕裂强度分别为 244. 17、198. 17 kN/m,而 PET 为 12. 53、8. 03 kN/m。DRP 的纵横向裤形撕裂强度分别是 PET 的 19. 49 倍、24. 68 倍。因此,通过 DRP 技术改性的 PET 材料极大地提高了裤形撕裂强度,有效地解决了 PET 薄膜遇缺口容易撕裂破坏的缺点。

3. 3 热稳定性表征

图 8 为 4 种薄膜的热重曲线。由图可知,DRP、PET、PO 和 PE 薄膜在升温到 600℃ 过程中都有 3 次较明显的失重过程,DRP 薄膜首次失重在 250℃ ± 5℃,PET 和 PO 膜均在 170℃ ± 5℃,PE 膜在 80℃ ± 5℃。第 3 次失重现象是 3 次中最为明显的一次,DRP、PET 和 PO 薄膜均在 350 ~ 400℃ 时发生,DRP 薄膜比 PET 和 PO 膜发生的温度略低。PE 膜在温度为 280℃ ± 5℃ 时发生第 3 次失重现象,是 4 种薄

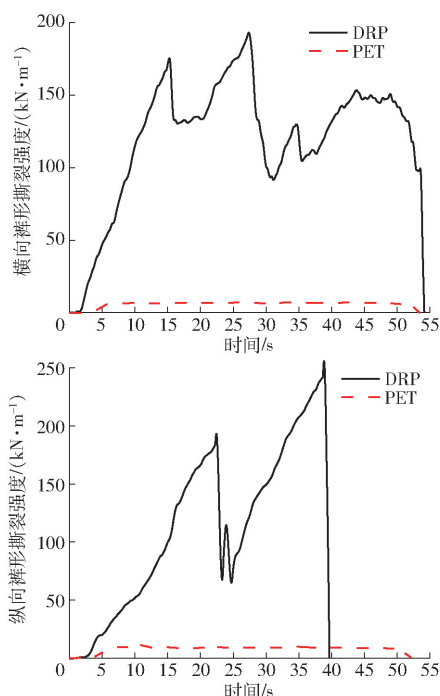


图7 DRP与PET薄膜裤形撕裂强度比较

Fig.7 Comparison of trouser tear strength between DRP and PET film

膜中第3次失重现象发生温度最低的薄膜。因此, DRP薄膜具有良好的热稳定性。

4 结论

(1) DRP薄膜透光率较高,具有很强的紫外线阻隔和夜间保温能力。在PAR波段透过率为90.73%,有助于植物更高效地进行光合作用;在5~25 μm波段中, DRP薄膜的透过率为14.56%,

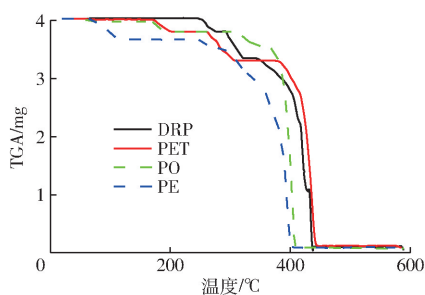


图8 DRP、PET、PO和PE薄膜热重曲线

Fig.8 Thermogravimetry curves of DRP, PET, PO and PE films

均低于其他3种薄膜,具有良好的红外阻隔能力,可以在夜间起到有效保温作用; DRP薄膜的UV波段透过率最低,紫外阻隔能力强。

(2) DRP薄膜抗拉强度和抗撕裂强度大。DRP薄膜纵向拉伸强度为103.21 MPa,纵向直角撕裂强度401.50 kN/m,在拉伸撕裂强度方面均优于PO膜和PE膜; DRP薄膜纵向裤形撕裂强度244.17 kN/m,是PET的19.49倍,极大提高了裤形抗撕裂强度,可以有效防止缺口撕裂破坏。

(3) DRP薄膜具有良好的热稳定性。DRP薄膜的首次失重发生在 $250^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$,高于其他3种薄膜。

(4) DRP薄膜在透光和保温方面具有较好的耐老化性。自然老化的DRP薄膜, PAR波段透过率为87.73%,在5~25 μm波段透过率为18.90%,两种性能分别降低3个百分点、4.34个百分点,可见自然老化的DRP薄膜仍然具有较好的透光保温性能。

参考文献

- [1] 束胜,康云艳,王玉,等. 世界设施园艺发展概况、特点及趋势分析[J]. 中国蔬菜, 2018(7): 1-13.
- [2] 毛罕平,晋春,陈勇. 温室环境控制方法研究进展分析与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 1-13. MAO Hanping, JIN Chun, CHEN Yong. Research progress and prospect on control methods of greenhouse environment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 1-13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180201&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.001. (in Chinese)
- [3] 程强,刘思莹,曲梅,等. PO膜和PE膜日光温室温光环境比较分析[J]. 中国蔬菜, 2011(增刊1): 72-77. CHENG Qiang, LIU Siying, QU Mei, et al. Comparative analysis of radiative and temperature environments between PO and PE greenhouses[J]. China Vegetables, 2011(Supp. 1): 72-77. (in Chinese)
- [4] 李东星,赵静,李树山,等. PO、PE棚膜对越冬日光温室环境条件及草莓产量品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2015(12): 53-56. LI Dongxing, ZHAO Jing, LI Shushan, et al. Effect of PO & PE film on environmental condition, strawberry yield and quality in over-winter solar greenhouse[J]. China Vegetables, 2015(12): 53-56. (in Chinese)
- [5] 李胜战,邹志荣. 新型薄膜覆盖材料的光学性能研究及其分析[J]. 农机化研究, 2009, 31(7): 185-188. LI Shengzhan, ZOU Zhirong. The optical property research and analyse of new film cladding material[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(7): 185-188. (in Chinese)
- [6] 王楠,马承伟,赵淑梅,等. 日光温室常用透光覆盖材料辐射透过性能测试研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2013, 44(5): 531-535. WANG Nan, MA Chengwei, ZHAO Shumei, et al. Measurement of transmissivity of solar greenhouse covering materials[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2013, 44(5): 531-535. (in Chinese)

- [7] 李永勃,孙美菊. EVA 型高保温 PO 膜生产与性能表征[J]. 塑料工业,2018,46(7):152–154.
LI Yongbo,SUN Meiju. The manufacture and analysis of capability EVA coating highly warm-keeping PO film[J]. China Plastics Industry,2018,46(7):152–154. (in Chinese)
- [8] 李衍素,王惠军,闫妍,等. PO 膜对日光温室温光环境和黄瓜产量的影响[J]. 中国蔬菜,2016(1):45–48.
LI Yansu,WANG Huijun,YAN Yan,et al. Effect of polyolefin film on thermal and light condition and yield of cucumber in solar greenhouse[J]. China Vegetables,2016(1):45–48. (in Chinese)
- [9] 蒋学勤,温学萍,徐苏萌,等. 纳米转光膜对日光温室环境因子及番茄产量的影响研究[J]. 宁夏农林科技,2018,59(9):6–7,17.
JIANG Xueqin,WEN Xueping,XU Sumeng,et al. An experimental study on influences of nano light conversion film on greenhouse environmental factors[J]. Ningxia Journal of Agri. and Fores. Sci. & Tech.,2018,59(9):6–7,17. (in Chinese)
- [10] 王宇欣,崔秋娜,刘海明,等. PET 薄膜在我国设施园艺中的应用前景探讨[J]. 农村实用工程技术(温室园艺),2005(12):23–25.
- [11] FADEL M A, HAMMAD B, FAISAL A H, et al. Greenhouses covering materials: a comparative study[J]. Agricultural Engineering International CIGR Journal, 2016, 18(1): 48–57.
- [12] 刘建,孙芳媛,王宝龙,等. 热区温室大棚塑料薄膜耐候性分析初探[J]. 农机化研究,2018,40(8):181–187.
LIU Jian,SUN Fangyuan,WANG Baolong,et al. Preliminary study on weather ability of greenhouse plastic film at tropics areas[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(8):181–187. (in Chinese)
- [13] KAVGA A, SOULIOTIS M, KOUMOULOS E P, et al. Environmental and nanomechanical testing of an alternative polymer nanocomposite greenhouse covering material[J]. Solar Energy, 2018, 159: 1–9.
- [14] XIE Xun, LIU Yujie, HAO Jionglu, et al. Feasibility study of a new solar greenhouse covering material[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2019, 224: 37–43.
- [15] 周大纲. 我国农膜行业的现状及其发展对策(2015 年)[J]. 塑料助剂,2015(6):13–15,41.
ZHOU Dagang. Status quo of agro-film industry (2015) of China and countermeasure for its development[J]. Plastic Additives,2015(6):13–15,41. (in Chinese)
- [16] 全国塑料标准化技术委员会. 塑料拉伸性能测定:GB/T 1040.3—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [17] 全国塑料制品标准化中心. 塑料直角撕裂性能试验方法:QB/T 1130—1991[S]. 1991.
- [18] 全国塑料标准化技术委员会. 塑料薄膜和薄片耐撕裂性能的测定第 1 部分:裤形撕裂法:GB/T 16578.1—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [19] 赖桂珍,钟继志,陈露芬,等. 塑料薄膜拉伸强度不确定度评定[J]. 广东化工,2018,45(9):220–221.
LAI Guizhen,ZHONG Jizhi,CHEN Lufen,et al. Evaluation of the uncertainty in plastic film tensile strength[J]. Guangdong Chemical Industry, 2018,45(9):220–221. (in Chinese)
- [20] 全国建筑用玻璃标准化技术委员会. 建筑玻璃可见光透射比、太阳光直接透射比、太阳能总透射比、紫外线透射比及有关窗玻璃参数的测定:GB/T 2680—94[S]. 北京:中国标准出版社,1994.
- [21] MCCREE K J. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants[J]. Agricultural Meteorology, 1972(9):191–216.
- [22] STIJGER H. All colours in light are equal for photosynthesis[J]. Flower Tech., 2004, 7(2):9–11.
- [23] 胡瑾,荆昊男,高攀,等. 融合黄瓜光质需求的设施光环境智能调控模型[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):329–336.
HU Jin,JING Haonan,GAO Pan,et al. Intelligent regulation model of light environment for facility cucumbers with light quality demand[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(9):329–336. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190938&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.038. (in Chinese)
- [24] 刘文科,杨其长. 紫外光在植物工厂中的分布特征及应用前景[J]. 科技导报,2014,32(10):29–31.
LIU Wenke,YANG Qichang. Distribution characteristics and regulation of ultraviolet light in plant factory production[J]. Science & Technology Review,2014,32(10):29–31. (in Chinese)
- [25] 丁小明,周长吉. 温室透光覆盖材料透光特性的测试[J]. 农业工程学报,2008,24(8):210–213.
DING Xiaoming,ZHOU Changji. Test and measurement of solar visible radiation transmittance of greenhouse glazing[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(8):210–213. (in Chinese)
- [26] 曹楠,林聪,王宇欣,等. PETP 薄膜保温特性的试验研究初报[J]. 农业工程学报,2004,20(4):242–245.
CAO Nan,LIN Cong,WANG Yuxin,et al. Preliminary experimental research on the heat preservation property of covering material PETP film[J]. Transactions of the CSAE,2004,20(4):242–245. (in Chinese)