

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.03.019

PE-LLD 散光膜氙灯加速老化行为及机制

张怡¹, 王富龙², 钟颜阳², 钟安澜¹, 龙思宇¹, 杨康¹

(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)

摘要: 农用聚乙烯散光棚膜可在较高透光率条件下提高雾度, 将透过膜面的直射光转为散射光, 促进膜内植株全维度获取有效光辐射。通过引入散光剂制备线型低密度聚乙烯(PE-LLD)散光膜, 实现透光率 90.99%、雾度 62.29%, 较空白对照膜透光率降低 0.55%、雾度提高 152.60%。耐老化性能是 PE-LLD 棚膜其他功效性能的基础保证, 采用氙灯老化对 PE-LLD 散光膜进行加速降解, 其宏观光学与力学性能变化趋势同空白膜一致, 二者断裂伸长率分别在 13 d 时降至初始值 40.58% 与 47.01% (完全老化)。综合考察 PE-LLD 散光膜加速老化过程化学组成、结晶行为、晶粒尺寸及微观形貌变化规律, 其老化过程随降解速度变化分 3 个阶段: 老化前期分子链交联密度上升, 二次结晶片段堆砌增大结晶度, 降解缓慢; 老化中期交联与降解并存, 界面处散光剂脱落促使膜面破裂, 片晶分布连续性降低, 降解速度适中; 老化后期分子主链降解加剧, 膜面裂纹向纵深延展, 力学性能快速降解至完全老化。研究表明, 引入散光剂可在不影响 PE-LLD 棚膜宏观使用功能与老化降解性能的基础上有效提高雾度, 实现散射光调控。

关键词: 线型低密度聚乙烯; 散光膜; 氙灯老化; 性能变化; 行为及机制

中图分类号: TQ322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)03-0119-07

Xenon lamp accelerated aging behavior and mechanism of PE-LLD light-diffusing film

ZHANG Yi¹, WANG Fulong², ZHONG Yanyang², ZHONG Anlan¹, LONG Siyu¹, YANG Kang¹

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

2. Guizhou Nanomaterials Engineering Center, Guiyang 550014, China)

Abstract : Agricultural polyethylene light-diffusing shed film can improve haze under the condition of high luminousness, and transform the direct light into diffused light, which can promote the inside plant to obtain effective light radiation in all dimensions. Linear low density polyethylene (PE-LLD) light-diffusing film was prepared by adding light diffusion agent, achieving a luminousness of 90.99% and a haze of 62.29%, which were 0.55% lower and 152.60% higher than the blank control film. Aging resistance is the basic guarantee of other functional properties of PE-LLD shed film, xenon lamp aging was used to accelerate the degradation of PE-LLD light-diffusing film, the macroscopic optical and mechanical property variation trend is consistent with blank film, and elongation at break of two films respectively decrease to 40.58% and 47.01% of the initial value at 13 d (completely aged). The chemical composition, crystallization behavior, crystallite dimension and morphology of the light-diffusing film during accelerated aging were investigated, aging process varied with degradation rate in three stages. In early stage of aging, the crosslink density of molecular chains rise, crystallinity improve with the secondary crystallization accumulation, the degradation rate is slow. In middle stage of aging, crosslinking and degradation reaction co-existed, light diffusing agent falls off from the interface and causes the film surface to break, the continuity of crystallization chains distribution decrease, the degradation rate is moderate. In later stage of aging, the degradation of the molecular main chain intensifies, film breakages extend to the depth, mechanical properties rapidly degrade to complete aging. The study shows that light diffusion agent can effectively improve haze and realize diffused light control without affecting the macro function and aging degradation performance of PE-LLD shed film.

Keywords : linear low density polyethylene ; light-diffusing ; xenon lamp accelerated aging ; property variation ; behavior and mechanism

基金项目: 贵州省基础研究计划[2019]1448 号, 贵州省基础研究计划[2020]1Z043 号, 贵阳市科技计划[2021]43-21 号, 贵阳市科技计划[2023]6-4 号
通信作者: 杨康, 硕士, 高级工程师, 研究方向为高分子材料改性技术

收稿日期: 2024-01-24

引用格式: 张怡, 王富龙, 钟颜阳, 等. PE-LLD 散光膜氙灯加速老化行为及机制[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(3): 119-125.

ZHANG Yi, WANG Fulong, ZHONG Yanyang, et al. Xenon lamp accelerated aging behavior and mechanism of PE-LLD light-diffusing film [J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(3): 119-125.

光照通过光合作用决定植物体内物质分配、运输、积累等生理生化过程,光能条件与植物生物学产量与品质直接相关^[1-4]。国家标准《农业用聚乙烯吹塑棚膜》(GB/T 4455-2019)中规定散光型棚膜的透光率 $\geq 85\%$ 、雾度 $\geq 50\%$,要求其与普通透明型棚膜透光率相同的条件下,将雾度提高30%以上,且不影响棚膜其他使用性能。棚膜雾度提高可将透过膜面的直射光转为散射光,促进膜内植株全维度获取有效辐射、增强光合效率,是强紫外光辐射地区设施农业的最佳覆盖材料。聚乙烯散光棚膜由分子量、支化度适宜的聚乙烯树脂、散光剂及抗氧剂熔融共混后多层共挤吹塑制得,散光剂混入使基体树脂折射率均匀性遭到破坏,从而将入射棚膜的点、线光源转化为面光源,实现棚膜雾度提高与散射光调控,使得膜内光照均匀柔和^[5-6]。

耐老化性能是聚乙烯其他功效性能的基础保证,不同功能制品耐老化性能研究是聚乙烯领域学术热点^[7-11]。Benmiloud等^[12]采用自然风化法监测撒哈拉地区低密度聚乙烯(PE-LD)棚膜性能变化,以差示扫描量热(DSC)分析与广角X射线衍射(WAXD)跟踪结构和形态变化、原子力显微镜(AFM)评估膜面形貌和粗糙度变化,发现老化过程棚膜结晶度逐渐提高、表面粗糙度不断增加。Wang等^[13]通过紫外加速和自然老化两种方法研究聚乙烯地膜老化过程,以傅里叶变换红外光谱(FTIR)表征含氧官能团变化,发现膜面发生化学氧化的时间通常在出现膜面裂纹的物理变化之后,两种老化方式地膜降解趋势一致,但前者降解速度更快。郭宸玮等^[14]采用不同温度对耐热聚乙烯进行热氧老化处理,以FTIR和热重分析(TG)表征性能变化,结果显示温度对耐热聚乙烯寿命有显著影响,随老化时间和温度的增加,试样最大分解速率增大、热稳定性下降、活化能下降。

聚乙烯棚膜散光调控技术起步较晚,相关老化性能研究鲜见报道。前期发现随聚乙烯棚膜中散光剂含量增加,棚膜雾度大幅提高、透光率逐渐降低。当散光剂质量分数为3.0%时可保证棚膜具有理想透光率并产生较好散光效果,同时棚膜力学与抗热氧老化性能较空白膜均略有提升^[15]。在此基础上,笔者采用氙灯加速老化法研究线型低密度聚乙烯(PE-LLD)散光膜老化行为,模拟散光膜在实际使用环境中暴露于可控湿度、温度、时间等条件下的

自然老化效果。对比加速老化条件下散光膜与空白膜宏观光学与力学性能变化规律,考察老化过程散射光调控对PE-LLD棚膜使用性能影响。综合分析散光膜化学组成、结晶行为、晶粒形态及微观形貌变化规律,探索散光膜加速老化理论机制,为强辐射地区聚乙烯散光膜应用提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

散光剂:NMS-02,白色粉末,贵州省纳米材料工程中心;

PE-LLD:7042,粉料,中国石油化工股份有限公司茂名分公司;

抗氧剂215:抗氧剂168与抗氧剂1010质量比为2:1,北京极易化工有限公司。

1.2 仪器及设备

双螺杆挤出造粒机:LSHJ-65,南京杰恩特机电有限公司;

上吹膜试验机: SJX3-700,浙江铸信机械有限公司;

氙灯老化箱: Ci5000,美国ATLAS亚太拉斯材料测试技术有限公司;

光电雾度仪: SGW-810,上海仪电物理光学仪器有限公司;

拉力试验机: HZ-1003B,上海恒准仪器科技有限公司;

FTIR仪: FTR-650,天津港东科技股份有限公司;

DSC仪: DSC25,美国TA仪器公司;

X射线衍射(XRD)仪: D8 advance,德国布鲁克公司;

扫描电子显微镜(SEM): EM-30 Plus,库塞姆COXEM(中国)公司。

1.3 PE-LLD散光膜与空白膜制备

将质量分数分别为3%、1%的散光剂和抗氧剂与PE-LLD树脂粉料混匀,经双螺杆挤出造粒,进料端至模头温度为150,180,190,190,190,180℃,熔体温度190℃。粒料于60℃干燥24 h去除水分,冷却备用。冷却后粒料经上吹膜试验机吹塑成型,进料端至模头温度分别为145,150,160,160,160℃,膜卷厚度控制为0.03 mm,分切得PE-LLD散光膜,取样常温静置24 h备用。相同工艺下采用纯PE-LLD树脂制膜,得对照组空白膜。

1.4 加速老化试验

按 GB/T 16422.2-2014,辐照方式按方法 A、辐照波长为 340 nm,辐照强度 $0.51 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$,辐照温度 65°C 、冷凝温度 40°C 下采用冷凝水喷淋 82 min,多次循环,对膜样进行加速老化处理。

1.5 测试与表征

光学性能测试:按 GB/T 2410-2008,采用 C 光源测定透光率(T)和雾度(H)。

力学性能测试:按 GB/T 1040.3-2006,拉伸速度 $200 \text{ mm}/\text{min}$,测定拉伸强度和断裂伸长率,膜样断裂伸长率降至初始值 50% 以下视为完全老化。

FTIR 测试:采用 ATR 工作台,测试范围 $4\,000\sim 650 \text{ cm}^{-1}$,扫描次数 64 次,分辨率 4 cm^{-1} 。计算膜样羰基指数(氧化程度) I_1 见公式(1)。

$$I_1 = A_{1714}/A_{1898} \quad (1)$$

式中: A_{1714} 为膜样 $1\,714 \text{ cm}^{-1}$ 处羰基 $\text{C}=\text{O}$ 峰光度; A_{1898} 为恒定值— CH —峰光度。

双键指数(不饱和程度) I_2 见公式(2)。

$$I_2 = A_{1652}/A_{1898} \quad (2)$$

式中: A_{1652} 为 $1\,652 \text{ cm}^{-1}$ 处不饱和碳链 $\text{C}=\text{C}$ 峰光度。

DSC 测试:先以 $20^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 200°C 后恒温 10 min 消除热历史,接着以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 降温至 40°C ,记录结晶曲线,最后以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 速率升温至 200°C ,记录熔融曲线。测定熔点温度(T_m)、结晶温度(T_c)、熔融焓(ΔH_m)。膜样结晶度 X_c 见公式(3)。

$$X_c = \Delta H_m \times (1 - X)/\Delta H_m^0 \times 100\% \quad (3)$$

式中: ΔH_m^0 为 PE-LLD 结晶度 100% 时对应熔融吸收热焓,值取 293 J/g ; X 为散光剂在 PE-LLD 散光膜中质量分数, %。

XRD 测试:管电压 40 kV ,管电流 40 mA ,扫描速度 $10^\circ/\text{min}$,扫描范围 $5^\circ\sim 90^\circ$ 。按谢乐公式和布拉格方程计算膜样特定晶面的晶粒尺寸和晶面间距,晶粒尺寸 $D=0.89\lambda/B\cos\theta$ 、晶面间距 $d=\lambda/2\sin\theta$,式中 0.89 为谢乐常数; B 为衍射峰半高宽度, nm ; θ 为衍射角, rad ; λ 为 X 射线波长,取 $0.154\,056 \text{ nm}$ 。

SEM 测试:膜样采用液氮冷处理脆断,取截面喷金测试,电流 10 mA ,喷金 120 s 。

2 结果与讨论

2.1 PE-LLD 散光膜老化机制

PE-LLD 棚膜田间覆盖易受光、热、氧、水、微生物、机械应力及酸碱浸蚀等引发各类老化交联或降

解反应,出现黄变、破裂及粉化现象。PE-LLD 是半结晶聚合物、自身无发色基团,但其聚合、成型、贮存等环节易生成副产物碳基、双键、杂质等不饱和基团,吸收 $290\sim 400 \text{ nm}$ 光波形成高活性自由基,发生光氧化与热氧化自由基链式综合反应。PE-LLD 老化以紫外光氧化降解为主导,多发生在分子链结构松、密度低、渗氧率高的非晶区,按 Norrish I 或 Norrish II 型机制发生老化降解与无规断链。Norrish I 型反应易发生在取代基较多 $\alpha\text{-C}$ 的 $\text{C}-\text{C}$ 弱键处,通过羰基与 $\alpha\text{-C}$ 断键生成酰基自由基和烷基自由基,再经自由基断链反应生成饱和烷烃、烯烃、醛及酮。Norrish II 型反应易发生在碳基邻位有三个及以上烷基的链段结构中,碳基链段含 $\gamma\text{-H}$ 时会发生分子内氢吸收,出现 $\alpha\text{-}\beta$ 间断键生成烯醇或酮和烯烃或 1,4-双自由基耦合闭环生成环丁醇^[16-17]。

2.2 加速老化过程散光膜光学性能分析

图 1 为加速老化过程 PE-LLD 散光膜光学性能变化图。由图 1 可知,未老化时 PE-LLD 散光膜透光率为 90.99%、雾度为 62.29%,较空白对照膜透光率降低 0.55%、雾度提高 152.60%。透明性佳、粒径适宜的有机硅散光剂对 PE-LLD 棚膜的散射光调控遵循非弹性粒子碰撞 Mie 散射规律,其能在理想透光率($\geq 85\%$)下大幅提高 PE-LLD 棚膜雾度,均匀柔和膜内光线。随老化时间延长,散光膜与空白膜光学

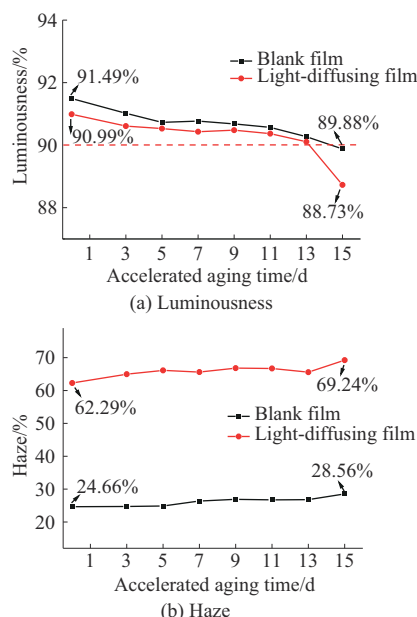


图1 加速老化过程PE-LLD散光膜光学性能

Fig. 1 Optical properties of PE-LLD light-diffusing film for accelerated aging process

性能变化缓慢、趋势一致,棚膜透光率逐渐降低、雾度逐渐升高。加速老化过程棚膜表面积尘与黄变破损导致透光率下降,散光膜与空白膜透光率均在老化15 d降至90%以下。同时,不同区域杂质吸附累积与分子链无规断链程度各异造成棚膜表面与内部折射率起伏,使得棚膜雾度不断升高。

2.3 加速老化过程PE-LLD散光膜力学性能分析

图2为加速老化过程PE-LLD散光膜力学性能图。由图2知,PE-LLD散光膜较空白膜力学性能略有提高,二者加速老化过程力学性能变化趋势一致,可分为0~5 d慢速老化,5~9 d中速老化及9~15 d快速老化三个阶段。PE-LLD老化有交联和降解两种形式,老化初期膜面完整、杂质渗透率低,力学性能衰减缓慢。老化中期光、氧及杂质大量渗入引起分子断链降解造成力学性能衰减,同时又伴有小分子链段重排交联提高结晶度和力学性能,此阶段降解与交联反应并存,棚膜老化速度适中。老化后期棚膜表面出现裂纹和严重破损,老化转为完全降解反应,分子主链无规断链加剧使力学性能快速衰减,散光膜和空白膜断裂伸长率分别在13 d时降至初始值的40.58%和47.01%(完全老化),散光膜相对衰减更快,衰减绝对值更低。可能由于散光剂内应力高于其与PE-LLD基体界面结合力,散光剂松动

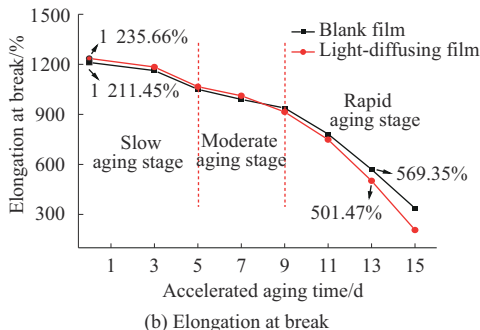
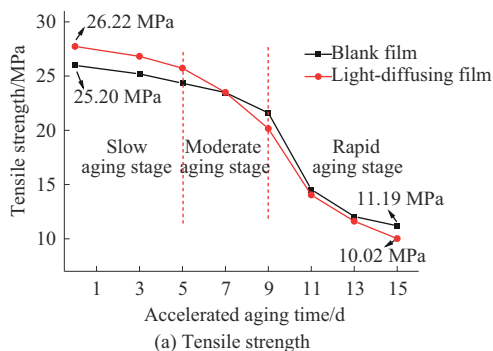


图2 加速老化过程PE-LLD散光膜力学性能

Fig. 2 Mechanical properties of PE-LLD light-diffusing film for accelerated aging process

阻碍自由基交联和脱落形成空穴造成散光膜力学性能衰减更快。

2.4 加速老化过程PE-LLD散光膜FTIR分析

图3为加速老化过程PE-LLD散光膜的FTIR图谱及其计算的膜面化学组分羰基指数与双键指数变化图。由图3a知,PE-LLD散光膜除PE-LLD吸收峰 2915 cm^{-1} ($-\text{CH}_2-$ 不对称吸收振动)、 2845 cm^{-1} ($-\text{CH}_2-$ 对称吸收振动)、 1459 cm^{-1} ($-\text{CH}_2-$ 弯曲振动)及 718 cm^{-1} ($-\text{CH}_2-$ 摇摆振动)外,新增散光剂吸收峰 1035 cm^{-1} (Si—O—Si非对称伸缩振动)与 782 cm^{-1} (Si—O对称伸缩振动)。由图3a知,随老化时间延长散光膜 1714 cm^{-1} 处氧化产物羰基C=O吸收峰(羰基指数)不断增强、 1652 cm^{-1} 处不饱和碳链产物C=C吸收峰(双键指数)先增强后减弱。加速老化过程,PE-LLD散光膜遵循Norrish I型和Norrish II型自由基链式反应,老化初期和中期0~9 d链引发首先发生在分子链活泼 α -C和 γ -H处产生一级自由基,一级自由基攻击分子链薄弱位点持续生成醛、酯、二级自由基、不饱和烷基及氢过氧化物等,造成分子链段断裂,也伴随重排、歧化、氧化等交联反应促进链增长,该阶段分子链氧化程度和不饱和程度均不断升高。老化后期9~15 d自由基链终止反应清除不饱和结构,小分子链段停止交联增

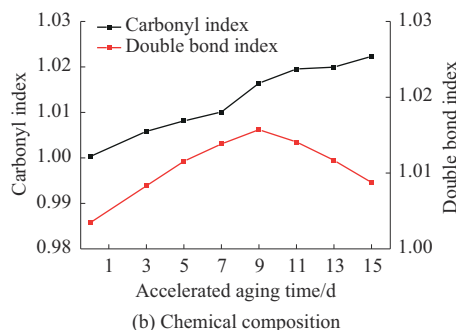
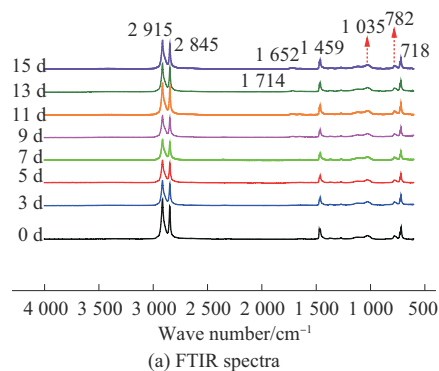


图3 加速老化过程PE-LLD散光膜FTIR图谱及化学组分计算结果

Fig. 3 FTIR spectra and chemical constituents of PE-LLD light-diffusing film for accelerated aging process

长,最终生成酮、醇、烷基等低分子量氧化物段,促进主链分子加速降解断链^[18],该阶段分子链氧化降解持续加剧、不饱和程度则逐渐降低。

2.5 加速老化过程PE-LLD 散光膜结晶行为分析

图4为加速老化过程PE-LLD 散光膜熔融曲线与结晶曲线,表1为散光膜结晶及熔融值。由图4和表1知,PE-LLD 散光膜熔点和结晶温度与空白膜接近,结晶度较空白膜提高8.07%,推测加入散光剂诱导异相成核,降低基体形成临界核所需自由能从而提高结晶度。散光膜加速老化过程以9 d为拐点,熔点、结晶温度及结晶度均呈先升高后降低趋势。老化初期和中期0~9 d氧气首先渗入结构疏松的非晶区和有结构缺陷的晶区引发自由基链式反

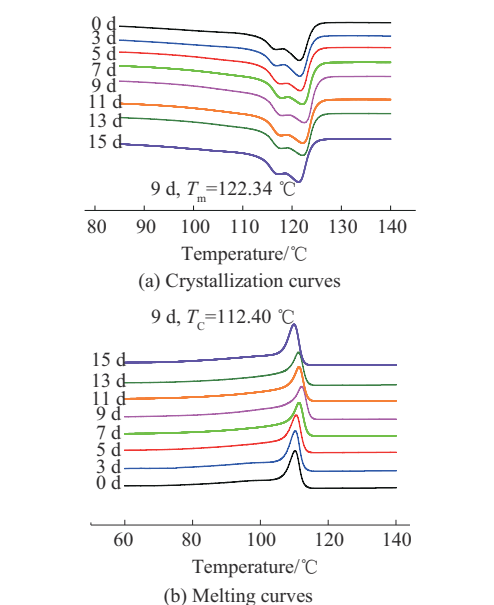


Fig. 4 DSC curves of PE-LLD light-diffusing film for accelerated aging process

表1 加速老化过程PE-LLD 散光膜DSC数据

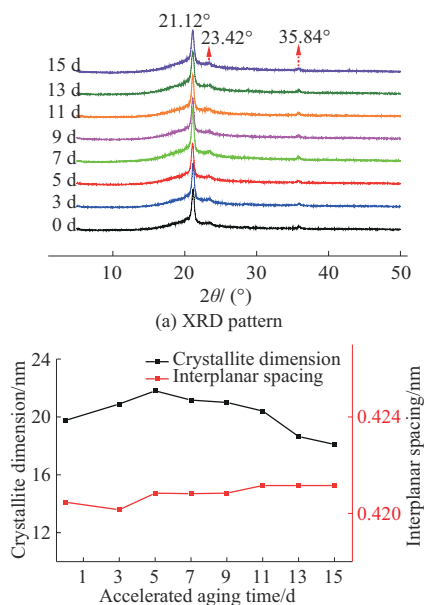
Tab. 1 DSC data of polyethylene light-diffusing film for accelerated aging process

Ageing time/d	Melting point/°C	Crystallization temperature/°C	Crystallization enthalpy/(J·g ⁻¹)	Crystallinity/%
0(blank film)	121.43	109.97	85.31	29.98
0(light-diffusing)	121.49	110.23	91.76	32.40
3	121.57	110.32	96.60	34.59
5	121.58	110.62	101.47	40.21
7	122.04	111.45	95.92	43.57
9	122.34	112.40	110.64	46.02
11	122.07	111.49	92.95	45.09
13	122.03	111.34	102.10	44.43
15	121.28	109.98	101.51	44.35

应,生成含不饱和官能团的支化短链易二次结晶重排,该阶段分子链段交联程度大于降解断链,交联密度增大提高PE-LLD 散光膜熔点、结晶温度和结晶度^[19],控制力学性能衰减。老化后期9~15 d氧气大量渗入,交联反应终止结晶度开始降低,散光剂脱落与膜面裂纹扩展促进分子链热运动和自由基快速攻击结晶区,PE-LLD 分子链缠结网络被破坏发生无规降解断链,使熔点和结晶温度下降,力学性能大幅衰减。

2.6 加速老化过程PE-LLD 散光膜晶粒尺寸分析

图5为加速老化过程PE-LLD 散光膜XRD图谱及其计算的特定晶面晶粒尺寸与晶面间距变化图。由图5a知,PE-LLD 散光膜在 2θ 为 21.12° 、 23.42° 及 35.84° 存在衍射峰^[20],分别对应PE-LLD 正交晶型特征晶面(110),(200)及(020),表明散光剂自身为无定型,其与PE-LLD 共混制膜不改变树脂原晶型结构。选取散光膜XRD吸收峰最尖锐(110)晶面研究其在加速老化过程中晶粒形貌变化规律,结果如图5b所示。由图5b知,随加速老化时间延长,散光膜晶粒尺寸先增大后减小、晶面间距先减小后增大。结合FTIR 和DSC分析,老化前期0~5 d非晶区和晶区缺陷处小分子链段重排交联,结晶片段相互堆砌使晶胞体积增大和结晶度升高,造成片晶尺寸增大、晶面间距减小。老化中期5~9 d自由基链增长交联反



(b) Crystallite dimension and change of grain size and spacing of crystal plane

图5 加速老化过程PE-LLD 散光膜XRD图谱及晶面晶粒尺寸与间距变化

Fig. 5 XRD pattern of PE-LLD light-diffusing film for accelerated aging process and change of grain size and spacing of crystal plane

应继续提高结晶度,但同时进行的分子断链降解反应使得链迁移率升高、片晶分布连续性降低,晶胞体积和晶粒尺寸缓慢减小、晶面间距增大。老化后期9~15 d以降解反应为主,主链结晶规整性迅速下降,使得球晶尺寸快速减小、晶面间距持续增大,薄膜完全老化。

2.7 加速老化过程PE-LLD散光膜微观形貌分析

图6为加速老化过程PE-LLD散光膜微观形貌SEM图。由图6知,PE-LLD散光膜中有机硅散光剂球形度高、粒径均匀,在基体中呈单分散态。老化前期0~5 d棚膜微观形貌变化不大,散光剂与基体树脂界面结合力完好,棚膜表面光滑完整、杂质

渗透性低、受外力时应力传导连续性佳,该阶段棚膜力学性能下降缓慢,光学性能下降主要源于表面杂质吸附。老化中期5~9 d时分子链老化断裂首先在界面处发生,散光剂与基体树脂分离形成弱界面后逐渐脱落,棚膜表面出现裂纹、粗糙度不断增大,促进光学和力学性能加速衰减。老化后期9~11 d时老化反应以分子链断裂降解为主,棚膜表面裂纹和散光剂脱落空穴逐渐增多,直至老化13~15 d散光剂成片脱落,杂质大量渗入使裂纹和破损位点向纵深延展,多处破损成片交叠产生多个应力发白区域,光学与力学性能迅速衰减至不再满足使用要求。

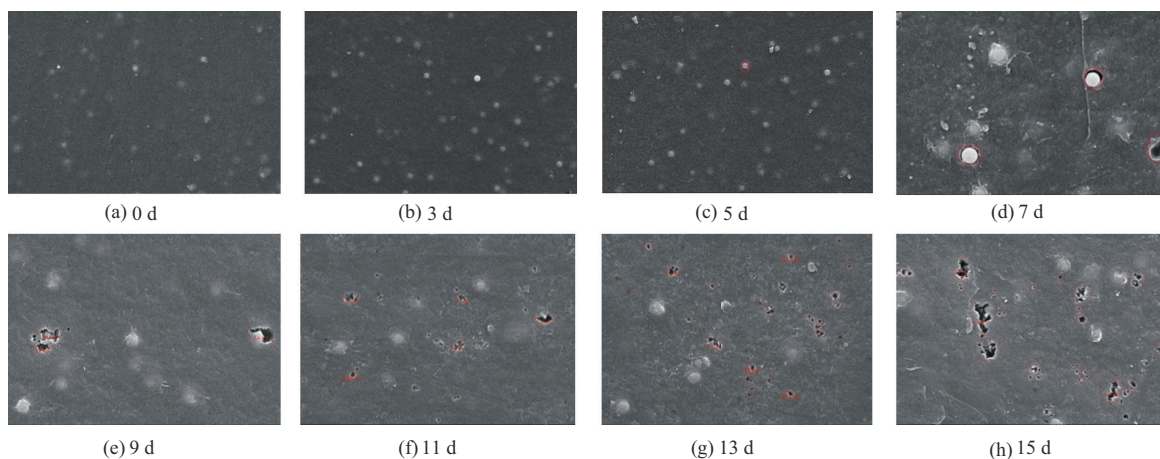


图6 加速老化过程PE-LLD散光膜微观形貌SEM图

Fig. 6 Surface morphology SEM images of PE-LLD light-diffusing film for accelerated aging process

3 结论

(1)采用氙灯老化法对PE-LLD散光膜进行加速降解,其宏观光学与力学性能变化趋势与空白对照组相同、完全老化时间一致。表明引入散光剂不影响PE-LLD棚膜原有使用性能,并能在理想透光率($\geq 85\%$)条件下,大幅度提高棚膜雾度、均匀膜内光照,实现聚乙烯散光膜长效散射光调控。

(2)PE-LLD散光膜加速老化分3个阶段:老化前期0~5 d膜面较为光滑完整,老化以交联反应为主,结晶片段相互堆砌增大片晶尺寸、减小晶面间距,使结晶度升高,光学性能变化主要源于表面杂质吸附、力学性能衰减缓慢;老化中期5~9 d交联反应与分子断链降解反应并存,片晶分布连续性降低,界面处散光剂脱落引起膜面破裂,促进光学与力学性能加速衰减;老化后期9~15 d以分子链断裂降解为主,主链结晶规整性下降,球晶尺寸快速减小、晶面间距持续增大,多处散光剂脱落造成表面破损位点向纵深延展,交叠产生成片应力发白区

域,光学与力学性能迅速衰减至不再满足使用要求。膜表面化学组分变化显示其氧化降解程度不断增强、不饱和程度随交联反应起止先增强后减弱

参考文献

- [1] HENDRIK P, ÜLO N, NIKOLAOS N, et al. Pons a meta-analysis of plant responses to light intensity for 70 traits ranging from molecules to whole plant performance[J]. The New Phytologist, 2019, 223(3):1 073–1 105.
- [2] SAITO K, ISHIGAMI Y, GOTO E. Evaluation of the light environment of a plant factory with artificial light by using an optical simulation[J]. Agronomy, 2020, 10(11). DOI: 10.3390/AGRONOMY 10111663.
- [3] VALERIA C, ALESSANDRA P, ROSARIO M, et al. Light and plant growth regulators on in vitro proliferation[J]. Plants, 2022, 11(7). DOI:10.3390/plants11070844.
- [4] 孙雨. 不同光质配比、光照强度和UV-A强度对生菜生长及品质的调控研究[D]. 邯郸:河北工程大学, 2022.
SUN Yu. Regulation of different light quality ratio, light intensity and UV-A intensity on lettuce growth and quality[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2022.

- [5] 任飞飞. 多孔聚苯乙烯微球制备及其光扩散剂应用研究[D]. 北京:北京化工大学,2019.
- REN Feifei. Preparation of porous polystyrene microspheres and application as optical diffusers[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology,2019.
- [6] WANG Tianyou, SUN Zhe, LIANG Feifei, et al. Poly (methylmethacrylate) microspheres with matting characteristic prepared by dispersion polymerization[J]. International Journal of Polymer Analysis and Characterization, 2019, 24(8):731–740.
- [7] MAJA R H, INES T, ZVONIMIR K, et al. Influence of ageing on optical, mechanical, and thermal properties of agricultural films[J]. Polymers, 2023, 15(17). DOI:10.3390/polym15173638.
- [8] BREDÁCS M, FRANK A, BASTERO A, et al. Accelerated aging of polyethylene pipe grades in aqueous chlorine dioxide at constant concentration[J]. Polymer Degradation and Stability, 2018, 157: 80–89.
- [9] 赵兴民, 赵建平, 燕集中. 高密度聚乙烯管材光氧老化性能及寿命预测[J]. 中国塑料, 2021, 35(6):33–39.
- ZHAO Xingmin, ZHAO Jianping, YAN Jizhong. Photo-oxidation aging performance and life prediction for high-density polyethylene pipe.[J]. China Plastics, 2021, 35(6):33–39.
- [10] WANG Yang, LAN Huiqing, MENG Tao. Lifetime prediction of natural gas polyethylene pipes with internal pressures[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 95:154–163.
- [11] VAZQUEZ Y V, RESSIA J A, CERRADA M L, et al. Prodegradant additives effect onto comercial polyolefins[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2019, 27:464–471.
- [12] BENMILOU N H, CHABIRA S F, BHAT A H, et al. Oxidative ageing and structural characterization of naturally weathered low density polyethylene films[J]. Polymer Science Series B, 2020, 62 (4):416–426.
- [13] WANG Ting, MA Yini, JI Rong. Aging processes of polyethylene mulch films and preparation of microplastics with environmental characteristics[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021, 107(4):736–740.
- [14] 郭宸玮, 牛国庆, 陈祉颖, 等. 热老化对耐热聚乙烯热解性能的影响及寿命预测[J]. 应用化工, 2021, 50(1):165–168, 174.
- GUO Chenwei, NIU Guoqing, CHEN Zhiying, et al. The effect of thermal aging on the pyrolysis performance of heat-resistant polyethylene and the life prediction[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(1):165–168, 174.
- [15] 钟颜阳, 王富龙, 王聚恒, 等. 高透高雾散光剂在聚乙烯棚膜中的应用研究[J]. 塑料科技, 2022, 50(11):72–75.
- ZHONG Yanyang, WANG Fulong, WANG Juheng, et al. Study on application of high transmittance and high haze astigmatism agent in polyethylene greenhouse film[J]. Plastics Science and Technology, 2022, 50(11):72–75.
- [16] 吴小伟. 水环境中聚丙烯微塑料的光老化过程及影响因素[D]. 南京:南京大学, 2021.
- WU Xiaowei. The photo aging process of polypropylene microplastics and related impact factors in aquatic environment[D]. Nanjing:Nanjing University, 2021.
- [17] 鲁雷. 全生物降解地膜大田试验玉米性状及其降解机理的研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2020.
- LU Lei. Study on characters and degradation mechanism of corn field experiments with biodegradable plastic film[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020.
- [18] JAISWAL P, PUSHKAR B, MAIKAP K. Abiotic aging assisted bio-oxidation and degradation of LLDPE/LDPE packaging polyethylene film by stimulated enrichment culture[J]. Polymer Degradation & Stability, 2022, 206. DOI: 10.1016/j. polymdegrad-stab.2022.110156.
- [19] MOO-TUN N M, VALADEZ-GONZÁLEZ A, URIBECALDERON J A. Thermo-oxidative aging of low density polyethylene blown films in presence of cellulose nanocrystals and a prooxidant additive[J]. Polymer Bulletin, 2018, 75(7):3 149–3 169.
- [20] CHANDRA R B J, SHIVAMURTHY B, VISHWANATHA H M, et al. Tensile and thermal behavior of linear low-density polyethylene nanocomposite films[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022. DOI:10.1088/1757-899X/1272/1/012024.