

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.10.001

抗紫外 PC/PMMA 交替微层复合薄膜的制备与性能

张义成,杨卫民,焦志伟,石美浓,黄亮

(北京化工大学机电工程学院,北京 100029)

摘要:为提高聚碳酸酯(PC)/聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)复合薄膜的抗光老化性能,选用具有高紫外线吸收能力的苯并三唑紫外线吸收剂(UV-P)作为PC的改性剂,并通过自制的微纳层叠装置制备出抗光老化的PC/PMMA复合薄膜。首先,利用双螺杆的剪切分散作用将不同添加量的UV-P与PC熔融共混并挤出造粒;然后,改性的PC与PMMA经自制的微纳层叠共挤装置挤出成型,制备复合薄膜;最后,对复合薄膜的结构和性能进行了表征。结果表明,具有有机小分子结构的UV-P在熔融态下能与聚合物材料有着良好的相容性;UV-P的加入对复合薄膜总失重率的影响并不大,但对复合薄膜第一阶段的热失重影响较大,在UV-P填充量为0.15%和0.8%时,复合薄膜的第一次热失重率由45.46%分别下降到36.79%和35.08%;在UV-P的填充量为0.35%时,复合薄膜在沿挤出方向及垂直于挤出方向的拉伸强度最大,分别达到72.2,52.4 MPa,同时沿挤出方向上的断裂伸长率也达到最大值,为11.8%;随着UV-P填充量的增加,复合薄膜的紫外线吸收率也逐渐提升,在UV-P的填充量为0.5%时,复合薄膜的光学性能最佳,可以屏蔽99%的380 nm以内的紫外线,并且平均透光率达到了82.1%的较高水平。

关键词:聚碳酸酯;聚甲基丙烯酸甲酯;复合薄膜;苯并三唑紫外线吸收剂;微层共挤;光老化

中图分类号: TQ325.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)10-0001-06

Preparation and Properties of Ultraviolet Resistant PC/PMMA Alternating Micro-layer Composite Films

Zhang Yicheng, Yang Weimin, Jiao Zhiwei, Shi Meinong, Huang Liang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract : In order to improve the anti-photoaging properties of PC / PMMA composite films, benzotriazole ultraviolet absorbent (UV-P) with high ultraviolet absorption capacity was selected as the modifier of PC, and anti-photoaging PC / PMMA composite films were prepared by self-made micro-nano cascade co-extrusion device. Firstly, UV-P and PC with different additions were melted and blended by twin-screw shear dispersion and extruded to granulate. Then, the modified PC and PMMA were extruded by micro-nano laminated co-extrusion device to prepare composite films. Finally, the structure and properties of composite films were characterized. The results show that UV-P with organic small molecular structure has good compatibility with polymer materials in molten state ; the addition of UV-P has little effect on the total weight loss of composite films, but has great influence on the thermal weight loss of composite films in the first stage. When the filling amount of UV-P is 0.15% and 0.8%, the first heat loss of composite films is significant. The weight ratio decreases from 45.46% to 36.79% and 35.08% respectively. When the filling amount of UV-P is 0.35%, the tensile strength of composite film along the extrusion direction and perpendicular to the extrusion direction reaches 72.2 MPa and 52.4 MPa respectively, and the elongation at break along the extrusion direction reaches the maximum value of 11.8%. With the increase of filling amount of UV-P, the ultraviolet absorption of composite film is the highest. The optical properties of alternating micro-layer PC/PMMA composite films are the best when the filling amount of UV-P is 0.5%. It can shield 99% of the ultraviolet radiation within 380 nm, and the average transmittance reaches a high level of 82.1%.

Keywords : polycarbonate ; polymethyl methacrylate ; composite film ; benzotriazole ultraviolet absorbent ; micro-layer co-extrusion ; photoaging

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0302000),北京市自然科学基金项目(2162033)

通讯作者: 焦志伟,副教授,主要研究方向为聚合物成型加工原理及设备 E-mail: jiaozw@mail.buct.edu.cn

收稿日期: 2019-07-16

引用格式: 张义成,杨卫民,焦志伟,等. 抗紫外 PC/PMMA 交替微层复合薄膜的制备与性能[J]. 工程塑料应用,2019,47(10):1-6.

Zhang Yicheng, Yang Weimin, Jiao Zhiwei, et al. Preparation and properties of ultraviolet resistant PC / PMMA alternating micro-layer composite films[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(10):1-6.

聚碳酸酯(PC)和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)均是具有良好透光性的材料。其中,PMMA能够透过大部分紫外线和部分红外线,但韧性不足,具有一定的脆性;而PC是典型的硬而韧的材料,可弥补PMMA的脆性对光学薄膜应用的限制,且两者折射率存在着一定的差值,因此可利用PC和PMMA制备出高红外反射的光学薄膜应用于建筑与工农业生产中^[1-5]。然而聚合物薄膜尤其是光学聚酯类薄膜在户外使用时,暴露在日光下,会因紫外线的辐射,出现外观和物理力学性能劣化,表现为变色、失去光泽、龟裂、银纹等现象,该类现象称为光老化^[6-8]。聚合物薄膜材料的光老化大大限制了材料的使用寿命,并且影响着产品的环保性与经济性。传统的光学聚酯薄膜的抗紫外线性能较差,耐老化性能不佳。如何提高聚合物薄膜的抗老化性能是聚酯类光学薄膜研究的重点。紫外线吸收剂作为一种光稳定剂,不仅可以提高薄膜的使用寿命,更能提高薄膜的综合性能^[9-10]。其作用是阻隔、吸收紫外线,大幅度减少高分子材料承受的辐射强度,减缓产品的老化速度,增强产品的耐候性能。

UV-P作为一类苯并三唑类高效紫外线吸收剂,化学名称为2-(2'-羟基-5'-甲基苯基)苯并三唑,分子式为 $C_{13}H_{11}N_3O$,是一种无色或浅黄色结晶粉末,可有效吸收290~400 nm的紫外线,本身的耐热和耐光性能优良^[11],且几乎不吸收可见光,可用于PC、PMMA材料的改性。UV-P作为光稳定剂的作用机理,是有选择性地强烈吸收紫外线,把吸收的能量转化为热能或无害的辐射释放出去,本身不发生化学变化,避免聚合物材料遭受紫外线的破坏,起到保护聚合物基体材料的作用。

笔者利用UV-P对PC进行共混改性后,与PMMA经自制的微纳层叠装置进行共挤成型制备复合薄膜,对复合薄膜的微观形貌、热稳定性和力学性能进行研究,并重点分析了UV-P对PC/PMMA复合薄膜紫外线吸收率和可见光透射率的影响。

1 实验部分

1.1 原材料

PC:1201HP-08,透光率90%,熔融加工温度240~320℃,折射率1.59,吸水率0.2%,韩国LG公司;

PMMA:VH001,透光率93%,折射率1.49,熔融加工温度160~270℃,吸水率0.3%~0.4%,韩国三菱公司;

UV-P:熔点130~131℃,相对密度1.38,不溶于水,深圳市乾泰擎天科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

真空干燥箱:DZF-6050型,上海一恒科技有限公司;

高速混合机:SHR-10A型,东莞鑫洪佳通用机械公司;

双螺杆挤出机:ZSK25-WLE型,德国科倍隆公司;

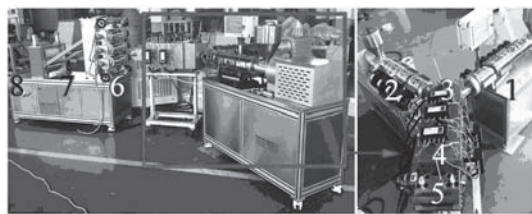
扫描电子显微镜(SEM):S-4700型,日本Hitachi公司;

热重(TG)分析仪:TG209C型,德国Netzsch公司;

万能试验机:4302型,美国Instron公司;

紫外可见双光束分光光度计:UV1900型,南京菲勒仪器有限公司。

自制的光学薄膜微纳层叠共挤装置^[12-15]试验线如图1所示。该试验线主要由两台挤出机、汇流器、层叠装置、挤出成型模头和成型收卷装置组成。实验过程中需要调试好加工温度、螺杆转速、牵引及收卷辊的速度,制备得到平整均匀、透明光滑的光学薄膜。图2为层叠流道原理图,展示了两种熔体在倍增器中实现层数的叠加过程,整个实验过程中可制得具有512层微层结构的PC/PMMA复合薄膜。



1—挤出机 I; 2—挤出机 II; 3—汇流器; 4—层叠装置; 5—挤出模头;
6—压延装置; 7—冷却架; 8—牵引与收卷装置

图1 微纳层叠共挤装置实物图

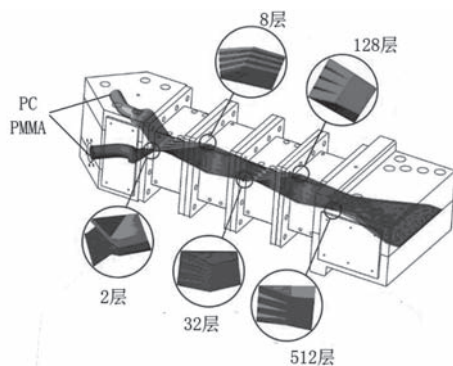


图2 层叠流道原理图

1.3 样品制备

首先将 PC 树脂置于鼓风干燥箱中 120℃ 干燥处理 8 h; 称取 5 份各 2 kg 的 PC 树脂, 分别加入不同质量分数的 (0, 0.15%, 0.35%, 0.5%, 0.8%) 的 UV-P, 并将混合物分别在高速混合机中初混合 10 min 后得到预混料, 再利用双螺杆挤出机进行挤出造粒, 得到 PC/UV-P 母粒, 双螺杆一区至八区温度依次为 230, 240, 250, 255, 260, 265, 270, 275℃, 螺杆转速 30 r/min。然后通过微纳层叠共挤装置与干燥处理后 (85℃, 4 h) 的 PMMA 树脂进行共挤成型, 得到 5 组不同 UV-P 填充量的交替微层 PC/PMMA 复合薄膜样品。微层共挤加工时挤出机 I (PC) 一区至四区温度依次为 245, 255, 265, 273℃, 连接处温度 270℃, 螺杆转速 20 r/min; 挤出机 II (PMMA) 一区至四区温度依次为 220, 235, 250, 260℃, 连接处温度 260℃, 螺杆转速 21 r/min; 层叠装置一至六区 265℃; 牵引上、中、下辊转速均为 16.6 r/min, 卷曲辊转速 16.5 r/min。此过程中, 保持不同配方复合薄膜样品的厚度相同。UV-P 质量分数为 0, 0.15%, 0.35%, 0.5%, 0.8% 时试样编号分别为 0[#], 1[#], 2[#], 3[#], 4[#]。

1.4 性能测试

SEM 测试: 取不同 UV-P 填充量的 PC/PMMA 交替微层薄膜样品, 放入液氮中充分冷冻后, 沿垂直于挤出方向淬断, 对断面进行喷金处理, 利用 SEM 观察 UV-P 与聚合物基体的相容情况。

TG 测试: 在氮气保护下, 分别取等质量的不同 UV-P 填充量的 PC/PMMA 复合薄膜样品在热分析仪中, 以 10℃/min 升温速率从室温加热到 1000℃, 得出相同条件下不同 UV-P 填充量的复合薄膜样品的 TG 曲线。

拉伸性能测试: 将不同 UV-P 填充量的 PC/PMMA 交替微层复合薄膜样品在沿着挤出方向及垂直于挤出方向上, 按照 GB/T 1040.3-2006 制作成矩形标准样条, 每组样条在万能试验机上以 3 mm/min 的速度测试三次, 取平均值得到样品的拉伸强度及断裂伸长率。

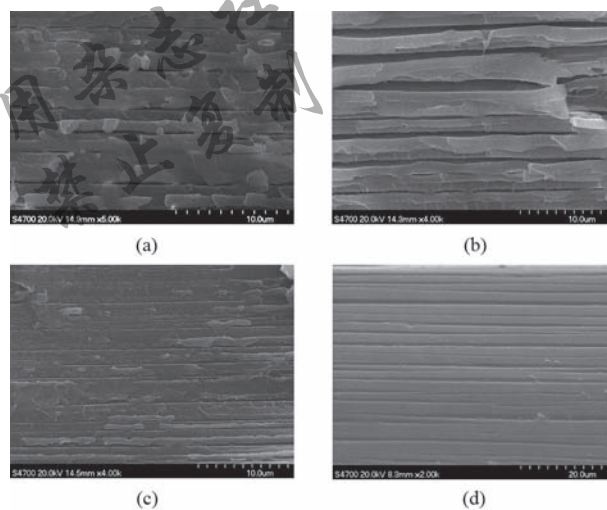
光学性能测试: 将双光束紫外分光光度计进行初始化操作, 测量可见光透射率时, 设置测试波长范围为可见光区域 (400~760 nm), 扫描步长设置为 1 nm, 然后装好透射夹具, 先进行基准校准, 再将样品放入, 分别测试膜材样品的可见光透射率; 测量紫外线吸收率时, 设置测试波长范围为紫外光区域

(200~400 nm), 扫描步长取 1 nm, 然后装好透射夹具并进行基线校准, 再将不同 UV-P 配方的复合薄膜样品放入, 分别测试膜材样品的紫外线吸收率与透过率。

2 结果与讨论

2.1 微观形态

图 3 为不同 UV-P 填充量的交替微层 PC/PMMA 复合薄膜的断面 SEM 照片。由图 3 观察可知, 通过对不同 UV-P 填充量的复合薄膜进行不同倍数放大时发现, 在复合薄膜的微观结构中, 几乎看不到小分子 UV-P 的分布。这是因为 UV-P 是一种有机小分子化合物, 与聚合物材料有着良好的相容性, 在树脂材料的成型加工温度范围内, 小分子 UV-P 已完全熔融, 并与聚合物材料相互融合, 且不影响聚合物材料的交替分层效果。



a—1[#]; b—2[#]; c—3[#]; d—4[#]

图 3 不同 UV-P 填充量的复合薄膜的断面 SEM 照片

2.2 热稳定性

图 4 为不同 UV-P 填充量的交替微层 PC/PMMA 复合薄膜的 TG 曲线。由图 4 可知, TG 曲线分为两个阶段失重, 这是因为复合薄膜由 PC 及 PMMA 两种聚合物材料组成, 且 PC 料的成型加工

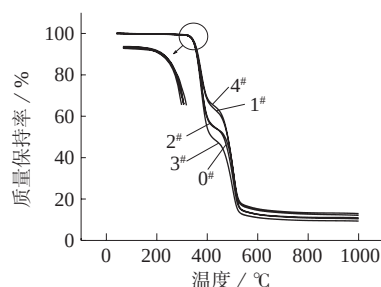


图 4 不同 UV-P 填充量的复合薄膜的 TG 曲线

温度略高于 PMMA 料的加工段温度,所以第一阶段为 PMMA 的热失重情况,第二阶段反映的是 PC 材料的热失重情况。图中可看出加入 UV-P 影响的是复合薄膜的第一次热失重,在 UV-P 填充量为 0.15% 和 0.8% 时,复合薄膜的第一次热失重率由 45.46% 下降到 36.79% 和 35.08%,在一定程度上减缓了复合薄膜基材的降解,提高了复合薄膜的热稳定性。随着 UV-P 填充量的增加,复合薄膜两个阶段的总失重分别由 89.53% 变化为 87.81%, 89.04%, 89.95%, 86.93%。总体来看,UV-P 的加入对复合薄膜的总热失重影响较小。

2.3 力学性能

图 5 及图 6 分别为不同 UV-P 填充量的交替多层 PC/PMMA 复合薄膜在沿挤出方向 (MD) 及垂直于挤出方向 (TD) 上的拉伸强度及断裂伸长率。随着 UV-P 填充量的增加,复合薄膜在 MD 及 TD 方向上的拉伸强度呈现先增大后减小的趋势,但强度值均高于未填充 UV-P 的复合薄膜,当 UV-P 填充量为 0.35% 时,复合薄膜的在 MD 和 TD 方向上的拉伸强度值达到最大,分别由 58.0, 42.8 MPa 提升到 72.2, 52.4 MPa。同时,在 MD 方向上的断裂伸长率达到最大值 11.8%,且在 TD 方向上也保持较高的数值。随着 UV-P 填充量的增加,复合薄膜在 MD 及 TD 方向上的断裂伸长率变化趋势与拉伸

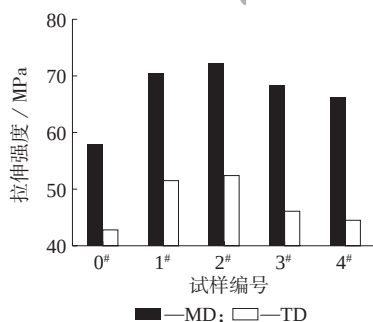


图 5 不同 UV-P 填充量的交替多层薄膜的拉伸强度

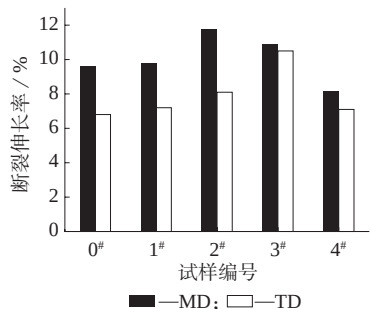


图 6 不同 UV-P 填充量的交替多层薄膜的断裂伸长率

强度基本一致。实验证明,UV-P 的加入可以有效提升复合薄膜的拉伸性能和韧性,当 UV-P 填充量为 0.35% 时,交替微层 PC/PMMA 薄膜的综合力学性能最佳。

2.4 光学性能

紫外光波段可分为长波紫外线 (简称 UVA, 波长 315 ~ 400 nm)、中波紫外线 (简称 UVB, 波长 280 ~ 315 nm) 以及短波紫外线 (简称 UVC, 波长 200 ~ 280 nm) 三部分。其中 UVC 几乎被臭氧层完全吸收而无法到达地面,到达地面的紫外光中 90% 以上为 UVA 光线和不足 10% 的 UVB 光线。图 7 为不同 UV-P 填充量的交替微层 PC/PMMA 复合薄膜的紫外线吸收谱 (200 ~ 400 nm)。可以看出,未填充 UV-P 的复合薄膜对紫外线的吸收能力较弱,不能大幅度地吸收 UVA 及 UVB 区域的紫外线。随着 UV-P 填充量的增加,复合薄膜的紫外线吸收能力快速提升,已经全部吸收 UVB 紫外线,并且可吸收绝大部分 UVA 紫外线。

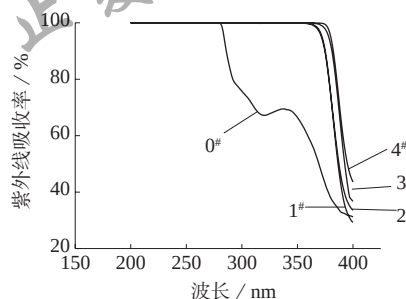


图 7 不同 UV-P 填充量的交替微层薄膜的紫外线吸收谱

图 8 及图 9 分别为不同 UV-P 填充量的交替微层薄膜在紫外光区域 (280 ~ 400 nm) 的平均紫外线透过率。从图中可看到,随着 UV-P 填充量的增加,在 280 ~ 315 nm 紫外波段的平均透过率由原本的 32.13% 分别迅速降到 1.41%, 1.53%, 0.35%, 0.15%, 阻隔紫外光的能力大幅度增强,当 UV-P 填充量为

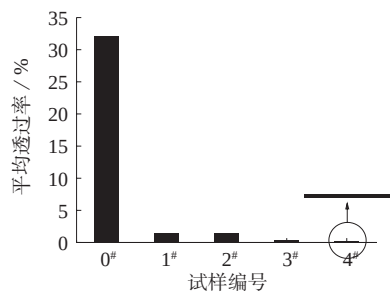


图 8 不同 UV-P 填充量的交替微层薄膜 280 ~ 315 nm 区域的平均透过率

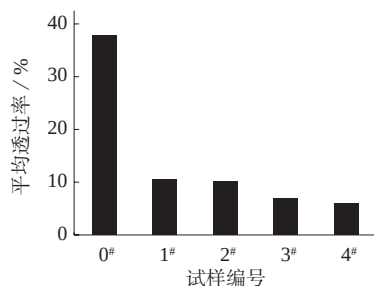


图9 不同 UV-P 填充量的交替微层薄膜 315~400 nm 区域的平均透过率

0.8% 时,几乎可以隔断 99% 的 315 nm 以内的紫外线。而在 315~400 nm 紫外波段,随着 UV-P 填充量的增加,平均紫外线透过率也分别骤降至 10.5%, 10.1%, 6.9%, 5.9%, 当 UV-P 填充量为 0.8% 时,几乎可以隔断 95% 的 400 nm 以内的紫外线。

图 10 为不同 UV-P 填充量的交替多层薄膜的可见光区域(400~760 nm)的透射光谱。可以发现,UV-P 填充量对交替微层薄膜的可见光透射率的影响不大,随着可见光波长的增加,复合薄膜的瞬时透射率缓慢增加,透射光谱的整体波长曲线在未填充 UV-P 的曲线上下较小的区域内浮动,这主要与 UV-P 不影响透明薄膜的透明度有关,适合于透明聚酯材料的改性研究。

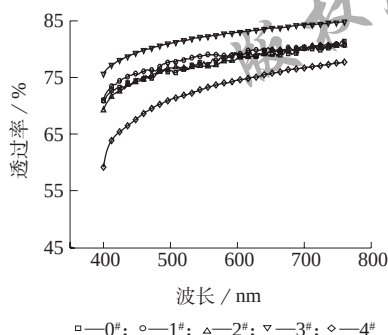


图 10 不同 UV-P 填充量的交替微层薄膜的可见光区域透射谱

图 11 所示为不同 UV-P 填充量的交替微层复合薄膜的平均透光率,在可见光区域(400~760 nm)内,随着 UV-P 填充量的增加,复合薄膜的平均透光率由 77.5% 分别变化为 78.4%, 77.4%, 82.1%, 73.0%, 总体上平均透光率在 75% 上下浮动。因此,在复合薄膜中通过填充少量的 UV-P 紫外线吸收剂,可以大幅度阻隔几乎全部的紫外线,且不影响薄膜的透光率。另外在 UV-P 填充量为 0.5% 时,复合薄膜的透光率提高了 4.6%,而在 UV-P 填充量为 0.8% 时,复合薄膜的透光率反而下降了 4.5%,这可能与复合薄膜的表面粗糙度因素有关,若表面粗

糙,薄膜的透光率则会有所降低。

综合来说,UV-P 的填充量为 0.5% 时,交替微层 PC/PMMA 复合薄膜的光学性能最佳,可以屏蔽 99% 的 380 nm 以内的紫外线,并且平均透光率达到了 82.1% 的较高水平。

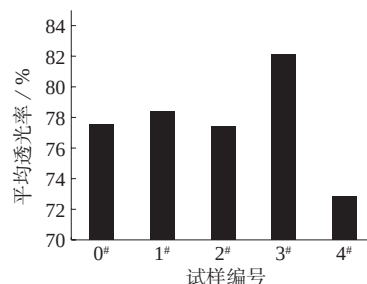


图 11 不同 UV-P 填充量的交替微层薄膜的平均透光率

3 结论

(1) UV-P 与复合薄膜基材 PC 和 PMMA 有着良好的相容性,不影响复合薄膜的分层效果,并且对复合薄膜的总失重率影响较小。

(2) 加入 UV-P 可以有效提升复合薄膜的拉伸强度和韧性。随着 UV-P 填充量的增加,复合薄膜在 MD 及 TD 方向上的拉伸强度均呈现出先增大后减小的趋势,且均高于未加入 UV-P 的复合薄膜的拉伸强度。其中,在 UV-P 的填充量为 0.35% 时,复合薄膜在 MD 及 TD 方向上的拉伸强度达到最大值,且在 MD 方向上的断裂伸长率达到最大值,此时复合薄膜的综合力学性能最佳。

(3) 未填充 UV-P 的复合薄膜对紫外线的吸收能力较弱,随着 UV-P 填充量的增加,复合薄膜的紫外线吸收能力快速提升,几乎能吸收全部的 UVB 紫外线以及绝大部分的 UVA 紫外线。当 UV-P 的填充量为 0.8% 时,可以阻断 99% 的 315 nm 以内的紫外线和 95% 的 400 nm 以内的紫外线。

(4) UV-P 的填充量对交替微层薄膜的可见光透光率的影响不大,随着 UV-P 填充量的增加,复合薄膜的平均透光率在 75% 上下浮动。

(5) UV-P 的填充量为 0.5% 时,交替微层 PC/PMMA 复合薄膜的光学性能最佳,可以屏蔽 99% 的 380 nm 以内的紫外线,并且平均透光率达到了 82.1% 的较高水平,能够满足光学薄膜的透光性能与抗老化性能。

参考文献

- [1] 熊良钊,杨卫民,周星,等.微纳层叠挤出技术的研究进展[J].中国塑料,2015,29(8):9-16.
Xiong Liangzhao, Yang Weimin, Zhou Xing, et al. Research

- progress of extrusion technology for micro-nano layer films[J]. China Plastics, 2015, 29(8):9-16.
- [2] 黄亮, 杨卫民, 林承友, 等. 聚合物交替多层聚碳酸酯/聚甲基丙烯酸甲酯近红外高反膜的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4):188-194.
- Huang Liang, Yang Weimin, Lin Chengyou, et al. Design of polycarbonate / polymethyl methacrylate polymer multilayer alternating films with high reflectivity in near-infrared region[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4):188-194.
- [3] 范存良. 聚碳酸酯的生产与应用[J]. 化工技术经济, 2003(10):11-14.
- Fan Cunliang. Production and application of polycarbonate[J]. Chemical Techno-Economics, 2013(10):11-14.
- [4] 李莉, 张有忱, 焦志伟, 等. 建筑节能膜制备技术进展[J]. 塑料, 2018, 47(3):118-121, 125.
- Li Li, Zhang Youchen, Jiao Zhiwei, et al. Progress of the building energy-saving membrane preparation technology[J]. Plastics, 2018, 47(3):118-121, 125.
- [5] 石美浓. 微纳层叠功能复合材料的界面效应分子动力学模拟及加工装备研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- Shi Meinong. Study on interfacial effect by molecular dynamics simulation and processing equipment of micro-nano laminating functional composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [6] 贾兆阳. 透明塑料薄膜对紫外线吸收性改进的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2007.
- Jia Zhaoyang. Study on improvement of ultraviolet absorption of transparent plastic films[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017.
- [7] 刘一楠, 刘珊珊, 王春明, 等. 光老化时间对旱柳枝桠材纤维/聚乳酸复合材料性能的影响[J]. 林业科技, 2019, 44(3):1-4, 64.
- Liu Yinan, Liu Shanshan, Wang Chunming, et al. The effect of light aging time on the properties of dryland willow wicker fiber / polylactic acid composite[J]. Forestry Science & Technology, 2019, 44(3):1-4, 64.
- [8] 张世明, 罗春明. 抗紫外线聚酯薄膜的研究[J]. 绝缘材料, 2010, 43(5):3-6.
- Zhang Shiming, Luo Chunming. Study on ultraviolet-resistant polyester films[J]. Insulating Materials, 2010, 43(5):3-6.
- [9] 陈晓康, 宁培森, 丁著明. 稳定剂提高聚氨酯材料抗紫外光老化性能的研究进展[J]. 塑料助剂, 2015(6):16-21.
- Chen Xiaokang, Ning Peisen, Ding Zhuming. Research advances of stabilizers on improving ultraviolet aging resistance of polyurethanes[J]. Plastics Additives, 2015(6):16-21.
- [10] 崔爱军, 辛健, 蔡煜明, 等. 有机改性金红石型纳米 TiO₂ 对聚乙醇酸抗光老化性能的研究[J]. 化工进展, 2018, 37(1):195-200.
- Cui Aijun, Xin Jian, Cai Yuming, et al. Study on photo-oxidative resistance of polyglycolic acid modified with organic nano-rutile-TiO₂[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(1):195-200.
- [11] 丁著明, 郭振宇. 紫外线吸收剂 UV-P 的合成和应用[J]. 塑料助剂, 2004(6):15-18.
- Ding Zhuming, Guo Zhenyu. Synthesis and application of ultraviolet absorber UV-P[J]. Plastics Additives, 2004(6):15-18.
- [12] 焦志伟, 李经龙, 程祥, 等. 一种光学多层梯度薄膜及其制备装置[P]. 中国: CN106707374A. 2017-05-24.
- Jiao Zhiwei, Li Jinglong, Cheng Xiang, et al. An optical multilayer gradient film and its fabrication device[P]. China: CN106707374A. 2017-05-24.
- [13] 杨卫民, 王德禧, 丁玉梅. 一种纳米多层复合材料制备装置[P]. 中国: CN2015 87107U. 2010-09-22.
- Yang Weimin, Wang Dexi, Ding Yumei. A fabrication device for nano-multilayer composites[P]. China: CN2015 87107U. 2010-09-22.
- [14] 黄亮, 杨卫民, 焦志伟, 等. 交替多层 PC/PMMA 光学薄膜的制备[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(11):6-10.
- Huang Liang, Yang Weimin, Jiao Zhiwei, et al. Preparation of alternating and multilayer PC/PMMA optical film[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(11):6-10.
- [15] 程翔, 杨卫民, 林承友, 等. Design of broadband near-infrared reflector using polymer multilayer heterostructure with low-refractive-index contrast[J]. Applied Physics A, 2017, 123(10):1-6.

本刊声明

近期有不法网站和个人假借本刊名义向广大读者征稿,同时收取高额注册费、审稿费、版面费。本刊特此声明:《工程塑料应用》为中国兵器工业集团第五三研究所(山东非金属材料研究所)主办,杂志社所在地为山东省济南市,本刊唯一投稿网址为 www.epa1973.net,本刊未委托任何机构和个人从事征稿和组稿业务。请广大作者牢记本刊投稿网址,辨别来电属地,不要给个人账户汇款,防止受骗。本刊保留对相关网站和个人追究法律责任的权利。

(工程塑料应用杂志社)