

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.10.023

TPEE 聚合阶段助剂接枝对其耐紫外老化性能的影响

李文豪, 张志峰, 陈震, 戴勇, 黎万丽, 尤润菁, 丁建萍

(新疆蓝山屯河科技股份有限公司, 新疆昌吉 831100)

摘要: 为解决热塑性聚酯弹性体(TPEE)在高温加工及其制品长期暴露于阳光下使用与存放时易发生黄变的问题,提出在 TPEE 聚合阶段,通过助剂接枝聚合技术将光稳定剂化学键合至聚酯分子链的方法,以提升材料的耐紫外老化性能。以聚对苯二甲酸丁二酯为硬段、聚四氢呋喃醚二醇为软段,在聚合过程中引入不同种类的抗氧化剂与光稳定剂,制备了多种抗老化助剂组合的 TPEE 样品。通过热重分析评估了各助剂的热稳定性,并对所合成 TPEE 的拉伸性能、硬度及熔体流动性进行测试,随后,将样品置于 60 °C 的紫外老化箱中进行 649 h 的老化试验,分析其老化前后黄变程度与拉伸强度的变化。结果表明,所选用抗老化助剂的热分解温度均高于 240 °C(TPEE 聚合温度),表明其适用于 TPEE 的聚合过程。通过加入合适的抗氧化剂和光稳定剂组合,可在维持 TPEE 力学性能基本不变的前提下,显著提升其耐紫外老化性能,具体表现为黄蓝色度(*b* 值)增长率降低及拉伸强度保留率提高。特别地,含有可接枝反应基团的光稳定剂对 TPEE 耐紫外老化性能的改善效果显著优于不含反应基团的同类助剂,验证了助剂接枝聚合技术的优越性。该策略不仅避免了下游市场为满足耐黄变要求而进行二次改性所带来的成本增加,同时也为高性能耐紫外老化聚酯的工业化制备提供了可行路径。

关键词: 接枝聚合;热塑性聚酯弹性体;耐紫外老化性能;光稳定剂;力学性能

中图分类号: TQ334.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)10-0186-07

Effects of additive graft polymerization during TPEE polymerization stage on its UV aging resistance

LI Wenhao, ZHANG Zhifeng, CHEN Zhen, DAI Yong, LI Wanli, YOU Runjing, DING Jianping

(Xinjiang Lanshan Tunhe Technology Co., Ltd., Changji 831100, China)

Abstract : To address the yellowing issue of thermoplastic polyester elastomer (TPEE) during high-temperature processing, as well as long-term exposure to sunlight in the use and storage of the products, the method of chemically bonding light stabilizers to the polyester molecular chains during the polymerization stage of TPEE via additive graft polymerization technology was proposed, thereby enhancing the material's UV aging resistance. Using polybutylene terephthalate as the hard segment and polytetrahydrofuran ether glycol as the soft segment, TPEE samples with different combinations of antioxidants and light stabilizers were prepared by introducing these anti-aging additives during polymerization. The thermal stability of the additives was evaluated by thermogravimetric analysis, and the tensile properties, hardness, and melt fluidity of the synthesized TPEE were tested. The samples were subjected to UV aging test for 649 h at 60 °C, and the changes in yellowness and tensile strength before and after aging were analyzed. The results show that the thermal decomposition temperatures of the selected anti-aging additives all exceed the polymerization temperature of TPEE (240 °C), indicating their suitability for the polymerization process of TPEE. By incorporating appropriate combinations of antioxidants and light stabilizers, the UV aging resistance of TPEE is significantly improved while maintaining its mechanical properties largely unchanged, which is manifested as a decrease in the growth rate of the yellow-blue hue (*b* value) and an increase in the retention rate of tensile strength. In particular, the improvement effect of light stabilizers containing graft reactive groups on the UV aging resistance of TPEE is significantly better than that of similar additives without reactive groups, validating the advantage of the additive grafting polymerization technique. This strategy not only avoids the cost increase associated with secondary modifications required to meet anti-yellowing demands in downstream markets, but also provides a viable pathway for the industrial production of UV-resistant polyesters with high performances.

Keywords : graft polymerization ; thermoplastic polyester elastomer (TPEE) ; UV aging resistance ; light stabilizer ; mechanical property

基金项目: 昌吉州科技计划项目(2022Z02)

通信作者: 丁建萍, 正高级工程师, 研究方向为生物降解材料的研发与产业化、高分子材料及生物基材料

收稿日期: 2025-07-27

引用格式: 李文豪, 张志峰, 陈震, 等. TPEE 聚合阶段助剂接枝对其耐紫外老化性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(10): 186–192.

LI Wenhao, ZHANG Zhifeng, CHEN Zhen, et al. Effects of additive graft polymerization during TPEE polymerization stage on its UV aging resistance[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10): 186–192.

聚酯材料在光老化方面的失效现象现已成为制约其工程应用的关键问题,并造成了显著的经济损失和环境风险^[1-3]。丁苏华^[4]研究发现,聚酯材料在氙灯照射老化1 800 h后,其关键力学性能(粘结强度、断裂伸长率)普遍下降50%以上,大幅缩短了材料的使用寿命。并且陈博等^[5]发现,老化后聚酯释放的降解产物可诱导神经细胞产生氧化应激反应,导致超氧化物歧化酶和丙二醛含量异常升高,谷胱甘肽过氧化物酶活性显著降低,这种抗氧化系统的失调可能对海洋生物产生潜在的神经毒性。所以如何提升聚酯材料的抗光老化性能已成为如今聚酯研究方面的热点之一^[6-7]。

在塑料的传统改性技术中,通常在加工过程中加入不同种类及用量的添加剂以延长材料的使用寿命并提升其使用性能。这些添加剂根据材料的用途不同,通常可分为增塑剂、抗氧化剂、光/热稳定剂、着色剂、阻燃剂等^[8-9]。常规的添加剂通常以填充的物理方式复合于树脂基体中,所以,当塑料材料暴露在室外环境时,在长期的老化过程中,材料本身与添加剂之间会存在一定的相互作用,进而影响塑料材料的光老化历程。若在树脂聚合阶段以化学键的形式将具有抗老化功能的添加剂结合在聚合物基体上,使添加剂在与基体结合更紧密的同时获得更好的分散均一性,可进一步提高材料耐老化效果^[10-11],同时省去下游改性工艺,降低生产成本。

当前对聚酯材料抗老化改性技术常受限于抗老化助剂与聚酯之间的相容性差、环保性低、成本高以及无法实现长期耐老化稳定等问题。 TiO_2 和 SiO_2 纳米粒子常被用于聚酯改性材料的添加剂^[12],然而这两种纳米粒子在聚酯基体存在分散不均等现象,导致局部应力集中,材料的抗紫外性能仅提升20%~30%,远低于理论预期。表面涂层技术也是抗老化改性的热点方法之一,但经表面涂层改性后的材料在光老化后,其与表面涂层间的界面结合强度会显著下降^[13-14],最多可下降50%,导致涂层剥落失效。综上,需要开发出一种高效稳定的抗老化改性方式。

目前,热塑性弹性体已成为高分子材料领域的一个研究热点,热塑性弹性体大致可分为三类:一类是聚苯乙烯嵌段共聚物,另一类是共混有弹性体的热塑性聚烯烃,第三类是多嵌段共聚物^[15-16],其中

热塑性聚酯弹性体(TPEE)则是以结晶态聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)为硬段、聚醚为软段的典型多嵌段共聚物代表,笔者以TPEE为对象,探究适用于在TPEE聚合阶段添加的抗老化助剂组合^[17-18]。

笔者在聚合过程中引入含反应基团的功能助剂(以环氧基为主)进行接枝反应,使助剂的反应基团在高温下与TPEE链段的羧基发生反应,产生键合,通过化学键将助剂直接引入到TPEE材料的分子链上,从而使助剂与TPEE形成稳定的化学键合,产生稳定的抗老化防护结构。

笔者根据新疆蓝山屯河聚酯有限公司下游客户在TPEE使用过程中的反馈,发现TPEE在高温加工下易黄变,同时将其应用于直接暴露于阳光下的户外制品后,在长期使用与存放时也产生了黄变问题,这已成为现阶段TPEE加工与应用中普遍存在的技术难点与痛点。故笔者以抗氧剂与光稳定剂的复配为解决方案,同时通过不同类型抗氧剂和光稳定剂的抗老化特点的差异进行组合以达到最佳抗老化效果,并对比在聚合阶段添加可与TPEE发生接枝反应的助剂(接枝助剂)和直接添加无反应基团的助剂这两种方式在TPEE产品抗老化效果上的差异,为解决聚酯材料的抗光老化难题提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

1,4-丁二醇(BDO)、聚四氢呋喃醚二醇(PTMEG):工业级,新疆蓝山屯河能源有限公司;

精对苯二甲酸(PTA):工业级,新疆中泰化学股份有限公司;

钛酸四丁酯、丙三醇:工业级,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

硫代酯类抗氧剂(DL-TDP,571)、受阻酚类抗氧剂(1010,329)、受阻胺类光稳定剂(6131,624)、含环氧基受阻胺类光稳定剂(293)、含异氰酸酯基紫外线吸收剂(947):南京经天纬化工有限公司。

1.2 主要设备及仪器

聚合反应釜:20L,烟台牟平曙光精密仪器厂;

热重(TG)分析仪:TGA7,美国Perkin-Elmer公司;

万能材料试验机:SHK-A102,苏州检卓仪器科技有限公司;

熔体流动速率(MFR)仪:XRL-400,承德精密试验机有限公司;

色差仪: Agera, 上海韵鼎国际贸易有限公司;

数显式邵氏硬度仪: ZBLX-D, 江苏正瑞泰邦电子科技有限公司;

紫外老化箱: BJY-209, 东莞宝嘉裕检测设备有限公司;

烘箱: TLD-120, 上海实贝仪器有限公司;

注射成型机: DHG-9123A, 海天塑机集团有限公司;

双螺杆挤出机: HTS35, 南京德腾机械有限公司。

1.3 TPEE弹性体的制备

在20 L反应釜中将合成原料(以BDO和PTA合成的PBT作为硬段, 质量分数为48%的PTMEG作为软段)、助剂(用量均为合成原料总质量的0.2%)以及催化剂钛酸四丁酯(用量为合成原料总质量的

0.04%)按一定比例混合加入, 反应釜逐步升温至240 °C, 压力控制在60 kPa, 当出水量达到90%的理论值时, 酯化反应基本结束, 而后将釜内逐步抽真空至100 Pa, 然后在240 °C下反应2 h至频率50 Hz、扭矩30 N·m, 此时缩聚反应结束, 达到聚合终点。将制备的材料经铸带、冷却成型、造粒、干燥等过程得到TPEE颗粒。

1.4 实验变量设置

对8种抗老化助剂进行编号(DL-TDP, 1010, 571, 329, 6131, 624, 293, 947分别编号为A1至A8), 按照1.3的合成步骤, 以邵氏D硬度为40的TPEE(40DTPEE)为例, 在酯化阶段分别加入不同助剂组合, 制备了8组TPEE材料, 分别编号为TPEE-1至TPEE-8, 见表1, 对合成的聚酯产品在220 °C注塑得到标准试样。

表1 8组TPEE材料中的助剂组合

Tab. 1 Additive combinations in 8 sets of TPEE materials

Additive type	TPEE-1	TPEE-2	TPEE-3	TPEE-4	TPEE-5	TPEE-6	TPEE-7	TPEE-8
Antioxidant	A1		A1	A1	A3	A3	A3	
	A2		A2	A2	A4	A4	A4	
Light stabilizer	A7	A5	A5		A5	A7		
	A8	A6	A6		A6	A8		

1.5 性能测试

MFR测试: 将TPEE样品在110 °C下干燥6 h, 按照GB/T 3682-2000的规定, 在温度230 °C、载荷2.16 kg下, 测定试样的MFR。

力学性能测试: 将TPEE样品在110 °C下干燥6 h后将其经注塑机成型为标准样条, 将制备好的样条于恒湿恒温箱[温度为23 °C、相对湿度为(50±10)%]中放置16 h以上, 采用万能材料试验机, 按照GB/T 528-2009测试样条的拉伸强度, 拉伸速度为50 mm/min。

紫外老化性能测试: 在常温下将注塑的TPEE板材放入紫外老化箱内, 将该设备内的温度以22 °C/min升到60 °C, 然后在这个条件下保持649 h, 每隔一段时间取出板材静置于通风处1 h后进行测量和记录。

TG测试: 取3~5 mg助剂样品放入TG分析仪的坩埚中, 设置升温速率10 °C/min, 自60 °C升温至750 °C, 到达750 °C后自动降温至30 °C, 记录热分解温度。同时将助剂置于240 °C下恒温10 h, 记录质量损失率。通过TG分析筛选出可在TPEE聚合阶段添加的助剂。

邵氏D硬度测试: 将注塑好的样品放置24 h, 然

后将试样放于硬度计水平平面上, 握住硬度计把手, 将其压针准直插入试样, 15 s读出硬度计示数, 测试6组, 取平均值。

色差测试: 将色差仪开机预热30 min, 将粒料倒入样品杯中, 装满并略高于杯口, 平稳放于测量仓后开始测试, 记录屏幕颜色数据。

2 结果与讨论

2.1 TPEE聚合用抗老化助剂的热稳定性分析

对符合产品抗老化功能要求的8种抗老化助剂进行TG测试, 结果如图1所示。从图1可以看出, 所选用的助剂在温度为350~450 °C时, 质量显著下

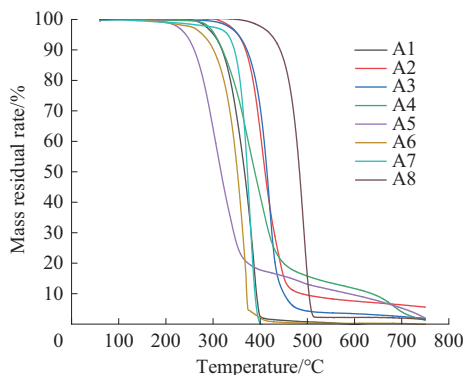


图1 不同抗老化助剂的TG曲线

Fig. 1 TG curves of different anti-aging additives

降。从图1可得到起始分解温度,见表2,同时列出各助剂在240℃恒温10 h后的质量损失率。由表2可以看出,所选用助剂的起始分解温度均在240℃以上,并且240℃下恒温10 h后的质量损失率均在25%以内,这些特性确保抗老化助剂在240℃的聚合过程中不会大量分解^[19]。

表2 不同抗老化助剂的热失重情况

Tab. 2 Thermal weight loss of different anti-aging additives

Additives	Initial decomposition temperature/℃	Mass loss rate at 240℃ for 10 h/%
A1 (DL-TDP)	270.6	1.2
A2 (1010)	310.0	1.9
A3 (571)	350.0	6.6
A4 (329)	290.1	24.9
A5 (6131)	240.6	23.1
A6 (624)	248.6	11.0
A7 (293)	304.5	3.2
A8 (947)	403.5	17.4

2.2 TPEE的力学性能测试结果分析

表3列出不同抗老化助剂组合下的40DTPEE力学性能。其中,TPEE-8为未添加抗老化助剂的空白组试样,其余各组试样分别加入不同种类的抗氧剂及光稳定剂,其中A1,A2,A3,A4为市面常见聚

合物用抗氧剂,A5,A6为在TPEE聚合阶段添加的无反应基团的光稳定剂,A7,A8为在TPEE聚合阶段加入的接枝光稳定剂。由表3看出,空白组试样的拉伸强度达到22.9 MPa,TPEE-1试样的拉伸强度下降至19.7 MPa,下降率仅为14.0%,TPEE-2至TPEE-7试样的拉伸强度下降率均小于14.0%,说明添加各种抗老化助剂后的TPEE材料在拉伸强度上并未发生显著变化。另外,空白组试样的断裂伸长率为846%,而TPEE-2和TPEE-6试样的断裂伸长率分别升高至911%和916%,明显高于其他试样,这说明一定的抗老化助剂组合可明显提高TPEE的断裂伸长率。同时,在邵氏硬度测试中,添加各种抗老化助剂后的试样和空白组试样的数值差距也很微小。以上测试结果均显示,在TPEE聚合阶段加入各种抗老化助剂后,材料的力学性能并未发生明显下降,部分性能甚至有增强的趋势。从MFR测试结果来看,在相同反应条件下TPEE-8的MFR最低,其余各组试样的MFR均有不同程度的增大,但均在15 g/10 min以下。证明了抗氧剂及光稳定剂对TPEE的聚合具有阻聚作用,但影响在可控范围内。

表3 不同抗老化助剂组合下的40DTPEE力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of 40DTPEE under different combinations of anti-aging additives

Items	TPEE-1	TPEE-2	TPEE-3	TPEE-4	TPEE-5	TPEE-6	TPEE-7	TPEE-8
Antioxidant	A1		A1	A1	A3	A3	A3	
	A2		A2	A2	A4	A4	A4	
Light stabilizer	A7	A5	A5		A5	A7		
	A8	A6	A6		A6	A8		
Tensile strength/MPa	19.7	22.4	22.3	20.2	20.9	21.0	20.5	22.9
Elongation at break/%	877	911	846	886	866	916	825	846
Hardness	38.5	37.9	38.0	36.9	36.4	38.0	38.5	38.9
MFR/[g·(10 min) ⁻¹]	13.97	10.26	14.52	12.14	14.65	13.86	13.01	9.56

2.3 TPEE的紫外老化测试结果分析

图2为将8组TPEE经注塑和剪裁后的板材置于紫外老化箱中进行649 h紫外老化后的外观情况,可以看出相比于参比样,每组样品均出现不同程度的黄变现象,且TPEE-2,TPEE-4,TPEE-7,TPEE-8表面除黄变外均出现裂痕,即老化较为严重。

为进一步直观比较各组助剂的抗老化效果,对每组TPEE试样在不同紫外老化时间下的黄蓝色度**b**值进行记录,绘制如图3所示的曲线,同时计算紫外老化649 h后各组TPEE试样**b**值相对于未老化前的增长率,结果见表4。

由图3和表4可知,在紫外老化649 h后,TPEE-

4,TPEE-5以及TPEE-8空白组试样的**b**值增长率均超过100%,证明只有采用合适的抗老化助剂组合才能获得较好的抗老化效果。其中TPEE-3和TPEE-5为添加无反应基团光稳定剂A5和A6的试样,相比于TPEE-8空白组试样,仍有一定抗老化效果,TPEE-2和TPEE-7表面出现裂纹,已存在性能丧失情况,故不作讨论。

相对而言,TPEE-1的**b**值在老化649 h后略微下降,而TPEE-6的**b**值增长率较低,这两种试样表面平整光滑无裂纹,抗老化效果较好^[20],证明了相比于未添加抗老化助剂的试样及添加无反应基团抗老化助剂的试样,在TPEE聚合阶段采用助剂接枝聚合技术制备的试样具有显著的抗紫外老化优势。

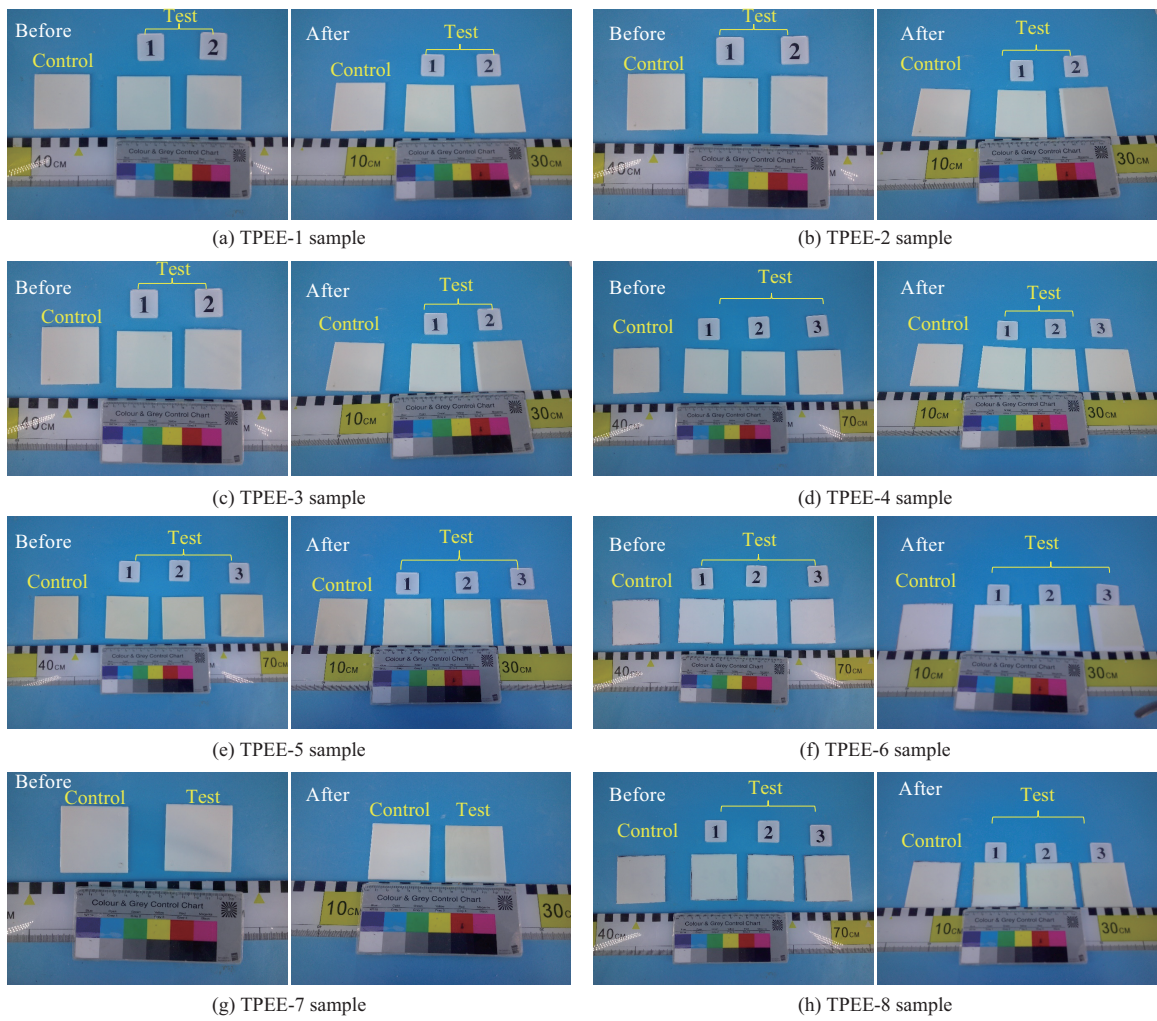


图2 紫外老化649 h后不同TPEE板材试样外观对比

Fig. 2 Comparison of appearance of different TPEE sheet samples after UV aging at 649 h

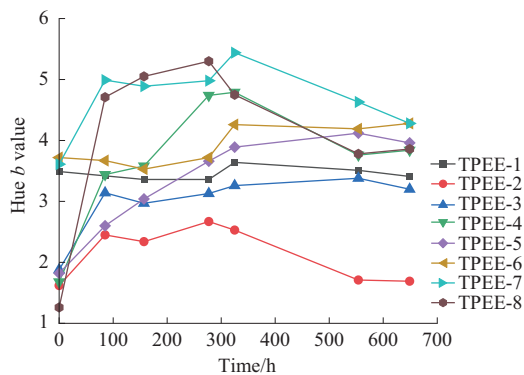


图3 不同TPEE试样在不同紫外老化时间下的色度b值变化趋势

Fig. 3 Variation trend of hue *b* value of different TPEE samples under different UV aging times

2.4 老化前后TPEE的拉伸性能对比

将添加不同抗老化助剂的TPEE试样在紫外老化649 h后进行拉伸强度测试,并与老化前的拉伸强度进行对比,从而计算得到拉伸强度保留率,结

表4 紫外老化649 h后色度*b*值增长率

Tab. 4 Growth rate of hue *b* value after UV aging at 649 h

Samples	Growth rate/%
TPEE-1	-2.3
TPEE-2	4.3
TPEE-3	70.2
TPEE-4	128.6
TPEE-5	117.6
TPEE-6	15.1
TPEE-7	18.6
TPEE-8	206.3

果见表5。从表5可知,TPEE-4及TPEE-8空白组试样在紫外老化649 h后的拉伸强度保留率最低,分别为65.8%和65.9%,其余各组试样的拉伸强度也有不同程度的降低,TPEE-2,TPEE-3,TPEE-5为添加无反应基团助剂制备的试样,其拉伸强度保留率相比空白组试样也有一定提升。TPEE-1试样的拉伸强度保留率最高,为83.2%,TPEE-6次之,故从力学性能考虑,TPEE-1和TPEE-6的抗紫外老化效果

表5 老化前后不同TPEE试样的拉伸强度保留率

Tab. 5 Retention rates of tensile strength of different TPEE samples before and after aging

Items	TPEE-1	TPEE-2	TPEE-3	TPEE-4	TPEE-5	TPEE-6	TPEE-7	TPEE-8
Tensile strength before aging/MPa	19.7	22.4	22.3	20.2	20.9	21.0	20.5	22.9
Tensile strength after aging/MPa	16.4	15.3	15.8	13.3	15.9	16.4	14.5	15.1
Retention rate of tensile strength/%	83.2	68.3	70.9	65.8	76.1	78.1	70.7	65.9

最佳,证明了抗老化助剂接枝聚合技术在TPEE紫外老化时保持材料力学性能方面具有明显优势。

2.5 机理分析

2.5.1 TPEE的紫外老化机理

TPEE材料的紫外老化需要经历紫外线吸收、自由基生成、氧化链式反应、分子链断链与交联、表面劣化等阶段。在老化初期,一方面由于紫外线的照射,材料内部的分子被激发产生能量跃迁,电子从基态转化为激发态,激发态的羰基($C=O$)和 $\alpha-C$ 与O之间的单键断裂,生成两个自由基,而激发态羰基从 γ 位抽取H原子,形成六元环过渡态,随后 β 位断裂;另一方面,紫外线照射下材料内部生成的烷基自由基($R\cdot$)迅速与 O_2 结合,形成过氧自由基($ROO\cdot$),进一步夺取H原子生成过氧化氢基团($ROOH$), $ROOH$ 在光热作用下分解为新的自由基($RO\cdot$ 和 $\cdot OH$),加速链式反应,自由基攻击导致酯键($-CO-O-$)断裂,使材料分子量下降,材料变脆。部分自由基重组形成交联网络,导致材料韧性下降和应力集中,分子链断裂导致表面应力释放,产生微裂纹,裂纹扩展路径沿结晶区与非晶区界面延伸。具体机理总结如下。

阶段1:紫外线吸收,TPEE分子链吸收紫外线 $\rightarrow$ 激发态形成;

阶段2:自由基生成,NorrishI型反应 $\rightarrow$ 产生 $R\cdot+\cdot COO\cdot$ 等自由基;

阶段3:氧化扩链, $R\cdot+O_2\rightarrow ROO\cdot\rightarrow ROOH\rightarrow$ 分解为 $RO\cdot/\cdot OH$;

阶段4:链断裂与交联,主链断裂(分子量下降)+局部交联(脆性上升)。

2.5.2 光稳定剂作用机理

光稳定剂的核心作用是打断光老化链式反应,通过不同机制阻止或延缓TPEE分子链的降解。本文中涉及的A5,A6,A7均为受阻胺类光稳定剂,当TPEE在紫外线作用下分解产生高活性自由基时,材料老化开始,而受阻胺类光稳定剂中的叔胺结构会氧化生成氮氧自由基,与聚合物产生的烷基自由基结合转化为稳定化合物。从而阻止分子链的进

一步降解。

A8为紫外线吸收剂,紫外吸收基团吸收入射紫外线光子,从基态跃迁到激发态,激发态分子再以无害方式将能量转化为热,返回到基态,循环往复。

2.5.3 光稳定剂接枝聚合机理

本文中助剂A7含有环氧官能团,在高温下聚合物链端羧基中氧原子亲核进攻环氧基团位阻较小的碳原子,环氧环打开,羧基与碳原子形成酯键,同时另一个碳原子生成一个羟基,则光稳定剂分子通过化学键连接在TPEE链端。

本文中助剂A8含有异氰酸酯基团,该基团的正电性碳原子会被聚合物上羟基氧原子、氨基氮原子等亲核进攻,导致 Π 键断裂,最终形成氨基甲酸酯结构和脲键,使A8牢固接枝在TPEE分子链上。

3 结论

(1)在TPEE聚合过程中引入合适的抗氧剂和光稳定剂组合能显著提升材料的耐紫外老化性能,不仅有效延缓了材料的黄变进程,也提高了老化后的拉伸强度保留率,最终改善了材料的终端使用性能。

(2)在TPEE聚合过程中通过助剂接枝聚合技术合成的40DTPEE的耐黄变性能显著优于空白组与添加无反应基团抗老化助剂的样品。

(3)在相同配方下采用助剂接枝聚合策略,可在保证合成的TPEE力学性能未发生明显变化的情况下实现优异的拉伸强度保持率和较低的 b 值增长率,成功实现了材料耐紫外老化性能与力学性能的平衡,为工业化生产高性能抗紫外老化TPEE提供借鉴。

参考文献

- [1] 王忠.扫描电子显微镜-能谱分析仪(SEM-EDS)中面扫描法在高分子材料失效分析中的应用[J].中国检验检测,2022,30(6):7-11.
WANG Zhong. Application of scanning electron microscopy-energy dispersive analysis(SEM-EDS) plane scanning method in failure analysis of polymer materials[J]. China Inspection Body & Laboratory, 2022, 30(6):7-11.
- [2] 陈延安,杨波,卢朝亮,等.耐光老化变色及耐划伤车内饰材料的研究[J].塑料工业,2025,53(6):62-70.

- Chen Yan'an, YANG Bo, LU Chaoliang, et al. Study on light aging/color change resistance and scratch resistance interior materials for vehicles[J]. China Plastics Industry, 2025, 53(6):62-70.
- [3] 万正一, 韩书亮, 宋文波. 聚烯烃弹性体在树脂改性中的应用研究进展[J]. 石油化工, 2025, 54(2):262-268.
- WAN Zhengyi, HAN Shuliang, SONG Wenbo. Research progress on application of polyolefin elastomers in resin modification[J]. Petrochemical Technology, 2025, 54(2):262-268.
- [4] 丁苏华. 建筑密封材料的老化试验与耐久性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2006.
- DING Suhua. Studies on weathering and durability of building sealants[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2006.
- [5] 陈博, 邢逸飞, 赵慧敏. 光老化PET纳米塑料对海洋生物神经毒性风险[J]. 海洋环境科学, 2024, 43(6):954-962.
- CHEN Bo, XING Yifei, ZHAO Huimin. Toxic and mechanism of light-aged PET nanoplastics on neuronal cells[J]. Marine Environmental Science, 2024, 43(6):954-962.
- [6] 陆志鹏, 韩顺涛, 劳志超, 等. 热塑性弹性体合成与改性的研究进展[J]. 橡塑技术与装备, 2024, 50(9):4-9.
- LU Zhipeng, HAN Shuntao, LAO Zhichao, et al. Research progress on synthesis and modification of thermoplastic elastomers[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2024, 50(9):4-9.
- [7] 金玉顺, 伍一波, 刘若凡, 等. 热塑性弹性体的制备与改性研究进展[J]. 弹性体, 2023, 33(6):83-91.
- JIN Yushun, WU Yibo, LIU Ruofan, et al. Research progress in preparation and modification of thermoplastic elastomers[J]. China Elastomerics, 2023, 33(6):83-91.
- [8] 陈康, 易志文, 周桂强, 等. 抗紫外老化高强聚酯纤维的制备与性能研究[J]. 合成纤维工业, 2017, 40(5):1-6.
- CHEN Kang, YI Zhiwen, ZHOU Guiqiang, et al. Preparation and properties of ultraviolet aging resistant high-strength polyester fiber[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2017, 40(5):1-6.
- [9] 易志文. 聚酯纤维的抗紫外老化特性研究[D]. 上海: 东华大学, 2015.
- YI Zhiwen. Anti-ultraviolet aging properties of polyester fiber[D]. Shanghai: Donghua University, 2015.
- [10] 王小帅. 小分子助剂在橡胶体系中迁移变色的机理分析和改进方法的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2024.
- WANG Xiaoshuai. Study on the mechanism analysis and improvement method of migration of small molecular additives in rubber system[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2024.
- [11] 翟云芳, 燕鹏华, 魏绪玲. 接枝聚合对ABS树脂性能影响的技术研究[J]. 塑料工业, 2022, 50(S1):49-52.
- ZHAI Yunfang, YAN Penghua, WEI Xuling, et al. Study on the effect of graft polymerization on the properties of ABS resin[J]. China Plastics Industry, 2022, 50(S1):49-52.
- [12] 康壮苏, 范传斌, 施方长, 等. SiO₂气凝胶/纤维复合材料的耐紫外老化性能研究[J]. 无机盐工业, 2025, 57(9):53-60.
- KANG Zhuangsu, FAN Chuanbin, SHI Fangchang, et al. Study on durability of silica aerogel/fiber composites under ultraviolet aging[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2025, 57(9):53-60.
- [13] 赵焯. BOPP复合膜涂层法表面改性技术应用进展[J]. 合成材料老化与应用, 2023, 52(6):98-102.
- ZHAO Ye. Surface modification of BOPP laminated film via coating method and its application development[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2023, 52(6):98-102.
- [14] 牛宏. 紫外线吸收剂在高分子材料光老化防护中的应用[J]. 化学工程与装备, 2025(1):31-33.
- NIU Hong. Application of UV absorbers in photo-aging protection of polymer materials[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2025(1):31-33.
- [15] 郑譔. 热塑性聚酯弹性体的制备与研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2013.
- ZHENG Xuan. Preparation and study of the thermoplastic polyester elastomers[D]. Wuhan: Hubei University, 2013.
- [16] 刘天明, 赵东, 沈育才, 等. 热塑性聚酯弹性体复合材料的制备与阻燃性能[J]. 复合材料学报, 2024, 41(3):1 249-1 258.
- LIU Tianming, ZHAO Dong, SHEN Yucui, et al. Preparation and flame retardancy of thermoplastic polyester elastomer composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(3):1 249-1 258.
- [17] 陈志明, 李晶, 张建. TPEE弹性体的合成及其结构与性能研究[J]. 合成纤维工业, 2023, 46(2):38-42.
- CHEN Zhiming, LI Jing, ZHANG Jian. Study on synthesis and structural properties of TPEE[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2023, 46(2):38-42.
- [18] 张立平, 吴春玉. 国外可降解塑料的开发与应用[J]. 国外油田工程, 2001(10):37-39.
- ZHANG Liping, WU Chunyu. Development and application of degradable plastics abroad[J]. Foreign Oil Field Engineering, 2001(10):37-39.
- [19] 王学亮, 周发明, 李伟, 等. 基于热重分析预测聚碳酸酯使用寿命研究[J]. 智慧轨道交通, 2023, 60(3):55-58.
- WANG Xueliang, ZHOU Faming, LI Wei, et al. Predicting the service life of polycarbonate based on thermogravimetric analysis[J]. Smart Rail Transit, 2023, 60(3):55-58.
- [20] 董宝田, 张超, 毕静利, 等. 聚碳酸酯中紫外线吸收剂的应用与评价[J]. 精细与专用化学品, 2022, 30(8):25-28.
- DONG Baotian, ZHANG Chao, BI Jingli, et al. Application and evaluation of ultraviolet absorbent in polycarbonate[J]. Fine and Specialty Chemicals, 2022, 30(8):25-28.