

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.01.026

光稳定剂对水工闸门用 PE-HD/ 高岭土复合材料性能的影响

宋力¹, 谢军², 胡立伟³, 陈小威⁴, 戚荣芳¹(1. 江苏省水利科学研究院材料结构研究所, 江苏扬州 225002; 2. 淮安市淮河水利建设工程有限公司, 江苏淮安 223400;
3. 江苏邗建集团有限公司, 江苏扬州 225100; 4. 江苏九星建设工程有限公司, 江苏宿迁 223800)

摘要: 采用共混造粒制备含有不同光稳定剂的水工闸门用高密度聚乙烯 (PE-HD)/ 高岭土复合材料, 讨论和研究光老化前后复合材料的力学性能变化规律。通过偏光显微镜观察复合材料试样表面形貌、采用傅里叶变换红外光谱和核磁共振氢谱对表面析出物进行分析, 讨论比较不同受阻胺光稳定剂的析出原因及抗光老化作用差异。结果表明, 添加光稳定剂 2020、光稳定剂 944、光稳定剂 123、光稳定剂 770 和光稳定剂 292 的复合材料光老化后力学性能保留率平均值分别为 87.1%、81.7%、79.1%、78.2% 和 75.6%, 抗光老化性能依次变弱; 分子量大的光稳定剂 2020 和光稳定剂 944 更容易与复合材料体系相容, 不容易析出, 具有更好的抗光老化作用, 同时带有较稠密的受阻胺结构的光稳定剂 2020 具有出色的抗光老化作用, 这可为 PE-HD/ 高岭土复合材料光稳定剂选配和抗光老化性失效分析提供参考。

关键词: 水工闸门; 高密度聚乙烯; 高岭土; 受阻胺光稳定剂; 助剂析出物

中图分类号: TQ325.1+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)01-0148-07

Effects of Light Stabilizer on Properties of PE-HD/Kaolin Composites for Hydraulic Gate

Song Li¹, Xie Jun², Hu Liwei³, Chen Xiaowei⁴, Qi Rongfang¹

(1. Material Structure Research Institute of Jiangsu Water Conservancy Research Institute, Yangzhou 225002, China; 2. Huai'an Huaihe Water Conservancy Construction Engineering Co., Ltd., Huai'an 223400, China; 3. Jiangsu Hanjian Group Co., Ltd., Yangzhou 225100, China; 4. Jiangsu Jiuxing Construction Engineering Co., Ltd., Suqian 223800, China)

Abstract: High density polyethylene (PE-HD)/kaolin composites with different hindered amine light stabilizers were prepared by blending granulation. The change rules of mechanical properties of the composites before and after light aging were discussed and studied. The surface morphology of the composites were observed by polarizing microscope, the surface precipitates were analyzed by Fourier transform infrared spectroscopy and nuclear magnetic resonance hydrogen spectroscopy, and the precipitation reason and anti-aging difference of different light stabilizers were discussed and compared. The results show that, after light aging, the average values of mechanical properties retention rates of the composites with adding light stabilizer 2020, light stabilizer 944, light stabilizer 123, light stabilizer 770 and light stabilizer 292 are 87.1%, 81.7%, 79.1%, 78.2%, 75.6% respectively, the light aging resistance becomes weaker in turn. Light stabilizer 2020 and light stabilizer 944 with large molecular weight are more easily compatible with the composite system, not easy to precipitate, and have better anti-light aging effects. Light stabilizer 2020 with dense hindered amine structure has excellent anti-light aging effect. This study provides a reference for the selection of light stabilizer and failure analysis of light aging resistance of PE-HD/kaolin composites.

Keywords: hydraulic gate; high density polyethylene; kaolin; hindered amine light stabilizer; precipitation of additives

当前我国水工闸门按门叶的材料划分主要分为钢闸门、铸铁镶铜闸门、木闸门、钢筋混凝土闸门和组合材料闸门。在我国东部地区的中低水头水利工程闸门情况下, 小型水利工程闸门广泛使用铸造

闸门和钢闸门。钢制闸门承载能力大、耐冲击, 材料性能和质量稳定, 但防腐性能差, 使用寿命相对较短。铸铁闸门防腐性能较好, 但铸铁闸门制作和安装的加工能耗高, 自重较大, 止水性能差, 安装成本

基金项目: 江苏省科技厅——省属公益类科研院所自主科研经费项目 (2019Z014)

通信作者: 宋力, 正高级工程师, 主要研究方向为水工材料及结构

收稿日期: 2021-10-19

引用格式: 宋力, 谢军, 胡立伟, 等. 光稳定剂对水工闸门用 PE-HD/ 高岭土复合材料性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(1):148-154.

Song Li, Xie Jun, Hu Liwei, et al. Effects of light stabilizer on properties of PE-HD/kaolin composites for hydraulic gate[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(1):148-154.

高^[1-2]。

随着不断提升水生态文明理念,新型节能、环保材料和设备越来越受到关注,环保型新材料、新工艺、新产品不断涌现。如何合理运用高效新型节能材料改变传统水工钢闸门“粗、大、笨、重”的现状,是相关科研院校和企业的研究重点。近年来,水工领域研发了高密度聚乙烯(PE-HD)面板与不锈钢框架组合结构的新型闸门,具有安装简单、操作便捷、节能环保、成本低、效率高等特点,已广泛应用于人工湿地、农业灌区改造工程等领域,在中小型水利工程中应用前景广阔。

PE-HD具有良好的耐热性和耐寒性^[3-4],还具有较高的刚性和韧性,广泛应用于各行各业。高岭土因其化学性质稳定、强度高和价格便宜,广泛应用于提高塑料和橡胶强度^[5-8]。董一夫等^[9]将硅烷偶联剂和钛酸酯偶联剂复配对高岭土表面进行改性,并将其与低密度聚乙烯共混,制备了具备优异刚性和耐热性的复合材料,同时质量分数20%的高岭土填充复合材料的体积电阻率达到最大值,可广泛应用于耐热和绝缘环境。但PE-HD/高岭土复合材料在水利闸门方面的应用研究仍是空白。由于闸门通常都处于户外环境,光照时间较长,严重影响材料的性能^[10-11]。在总结和分析国内外高强轻便耐久材料的基础上,笔者选配几种不同分子量的光稳定剂,通过熔融共混方式开发出一种轻质、耐久、美观和便于制作维护的组合结构闸门用PE-HD/高岭土复合材料,研究不同光稳定剂对复合材料性能的影响,并通过表征手段研究不同光稳定剂的作用机理和相应材料的失效原因分析,为户外用高耐光热聚烯烃材料的开发和制备提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

PE-HD:BE0400,熔体流动速率0.4 g/10 min (190℃,5.0 kg),密度0.94~0.96 g/cm³,韩国LG化学公司;

马来酸酐接枝高密度聚乙烯(PE-HD-g-MAH):熔体流动速率1~3 g/10 min (190℃,2.16 kg),熔点130℃,密度0.95 g/cm³,厦门科艾斯塑胶科技有限公司;

高岭土:IN-1250,粒度10 μm (95%以上),石家庄辰兴高岭土加工厂;

抗氧剂1010、抗氧剂168、光稳定剂770:宜兴市天使合成化学有限公司;

乙撑双硬脂酰胺(EBS):江西宏远化工有限公司;

光稳定剂123:广州特磊新材料有限公司;

光稳定剂944:重均分子量2000~3000,广州特磊新材料有限公司;

光稳定剂2020:重均分子量2600~3400,德国BASF公司;

光稳定剂292:北京天罡助剂有限责任公司。

1.2 主要仪器与设备

密炼机:X(S)N-5X32型,大连亿翔橡塑机械有限公司;

双螺杆挤出机:SHJ-36型,南京杰恩特机电有限公司;

注塑机:LSF-98型,常州市龙盛机械有限公司;

平板硫化机:30T,东莞市众诚精密仪器有限公司;

电子万能试验机:E45-305型,美国MTS公司;

悬臂梁冲击试验机:ZBC1400-B型,美国MTS公司;

老化烘箱:Q-SUN Xe-3-HSCE型,美国Q-LAB公司;

动态热机械分析(DMA)仪:Q800型,美国Waters公司;

偏光显微镜:SZX7-1093型,日本Olympus公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet iS50型,美国Thermo Fisher公司;

核磁共振仪:AVANCE III HD 600M型,德国Bruker公司。

1.3 试样制备

将不同组分按照一定配比称取后,置于密炼机中共混,密炼温度190℃,密炼时间10 min,螺杆转速30 r/min。将密炼制备的料块冷却后进行破碎,将得到的粉碎料加入到双螺杆挤出机中进行进一步混炼,然后拉条、冷却和切粒。挤出机参数为:一至七区温度150,155,160,165,170,180,190℃,机头温度190℃,熔体温度190℃,主机螺杆转速17.1 r/min,喂料机螺杆转速11.7 r/min。

将双螺杆造粒得到的粒子经过注塑制成标准测试样条,拉伸测试样条按照GB/T 1040.2-2006中1A尺寸要求制样,冲击测试样条按照GB/T 18943-2008要求制样。注塑机料筒温度依次设为一区50℃、二区200℃、三区210℃、四区230℃、五

区 240℃、六区 240℃,喷嘴温度 240℃,模具温度 50℃。

共混制得的不同光稳定剂的 PE-HD/高岭土复合材料试样编号见表 1,其中基材 PE-HD, PE-HD-g-MAH,高岭土, EBS 的质量分数分别为 65%, 4.8%, 28.7% 和 0.5%, 抗氧剂 1010 和抗氧剂 168 的质量分数分别为 0.4% 和 0.2%, 光稳定剂质量分数为 0.4%。

表 1 不同光稳定剂的 PE-HD/高岭土复合材料试样编号

试样编号	抗氧剂	光稳定剂
S1		
S2	1010+168	
S3	1010+168	2020
S4	1010+168	770
S5	1010+168	123
S6	1010+168	944
S7	1010+168	292

1.4 性能测试与表征

(1) 力学性能测试。

拉伸强度和断裂伸长率依据 GB/T 1040.2-2006 测试,拉伸速率为 100 mm/min,标距 115 mm;冲击强度依据 GB/T 18943-2008 测试,摆锤冲击速度 3.5 m/s,摆锤能量 11 J。

(2) 光热老化试验。

热老化试验条件为 70℃/300 h。在光老化试验中,光源和方法依据 GB/T 16422.2-2014,黑板温度 65℃,喷水周期 18 min/102 min,累计辐照时长 720 h。

(3) 动态力学性能测试。

采用 DMA 仪测试复合材料试样老化后的储能模量,试样尺寸为 30 mm×5 mm×0.5 mm,测试频率 1 Hz,振幅 20 μm,温度范围 -80℃~150℃,升温速率 3℃/min,氮气氛围。

(4) 偏光显微镜测试。

采用偏光显微镜对老化前后样条进行常温形貌观察,放大倍数为 500 倍,标尺为 150 μm。

(5) FTIR 测试。

将热老化后的样条表面析出物刮下富集,采用 FTIR 仪对析出物进行测试,扫描范围 400~4000 cm⁻¹,分辨率 2 cm⁻¹,扫描 32 次,采用衰减全反射法(ATR)。

(6) 核磁共振氢谱(¹H-NMR)测试。

将热老化后的样条表面析出物刮下富集,溶解在 650 μL 的氘代氯仿(CDCl₃)中,采用核磁共振仪对析出物进行测试,扫描 16 次。

2 结果与讨论

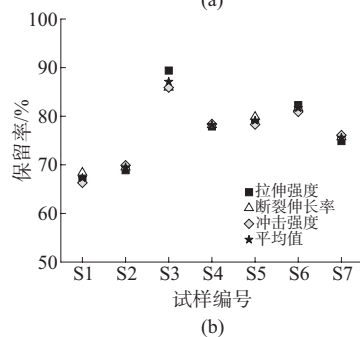
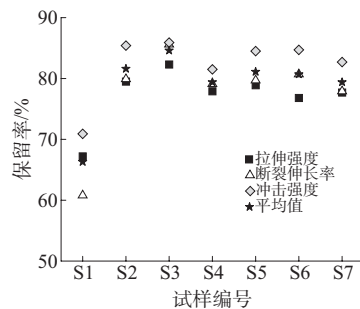
2.1 老化前后复合材料力学性能变化规律

测试了热和光老化前后不同光稳定剂和抗氧剂组合下 PE-HD/高岭土复合材料试样的力学性能变化情况,结果见表 2。图 1 为老化后各复合材料试样的力学性能保留率。

由表 2 测试数据可知,未老化前各试样拉伸强度、断裂伸长率和冲击强度分别位于 28.5 MPa, 508% 和 65.0 J/cm 左右,浮动较小。当热老化后,复合材料力学性能出现不同的降低, S1 至 S7 的拉伸强度、断裂伸长率和冲击强度的保留率平均值分别为 66.3%, 81.6%, 84.6%, 79.5%, 81.1%, 80.7% 和 79.4%, 如图 1a 所示。由于 S1 未添加抗氧剂,复合材料抗热老化性能较弱,经热老化后,力学性能下降明显。S2-S7 经热老化后力学性能没有明显差异,其热老化后三项力学性能指标位于 22.4 MPa,

表 2 复合材料热和光老化前后的力学性能

条件	力学性能	试样编号						
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
老化前	拉伸强度/MPa	28.5	28.3	28.2	28.1	28.5	28.9	28.7
	断裂伸长率/%	510	503	506	505	508	508	515
	冲击强度/(J·cm ⁻¹)	65.1	64.5	64.9	64.9	65.2	65.2	65.4
热老化后	拉伸强度/MPa	19.1	22.5	23.2	21.9	22.5	22.2	22.3
	断裂伸长率/%	310	402	433	399	405	410	401
	冲击强度/(J·cm ⁻¹)	46.2	55.1	55.8	52.9	55.1	55.2	54.1
光老化后	拉伸强度/MPa	19.1	19.5	25.2	21.9	22.5	23.8	21.5
	断裂伸长率/%	349	350	435	395	406	415	390
	冲击强度/(J·cm ⁻¹)	43.2	45.1	55.8	50.9	51.1	52.8	49.8



a—热老化后; b—光老化后

图 1 复合材料热和光老化后力学性能的保留率

408%和54.7 J/cm左右。主要原因是受阻胺光稳定剂和抗氧剂1010/168具有很好的协同作用,提高了体系的抗热老化性能^[10]。

复合材料经光老化后,各试样力学性能变化差异明显。S1至S7的三项力学性能的保留率平均值分别为67.3%,69.5%,87.1%,78.2%,79.1%,81.7%和75.6%,如图1b所示。可见光稳定剂2020显著提高试样的抗光老化能力,光老化后三项力学性能仍可以达到25.2 MPa,435%和55.8 J/cm,如表2所示。光稳定剂944的抗光老化性能仅次于光稳定剂2020,主要是因为光稳定剂2020具有更稠密的受阻胺结构,相比光稳定剂944表现更好的耐光稳定性。光稳定剂123,770和292的抗光老化性能依次变弱。说明大分子量和稠密受阻胺结构的光稳定剂能更好地与材料体系相容搭配,具有优异的光稳定性能。因此,后续重点对光老化后复合材料进行表征和研究。

2.2 老化前后复合材料动态力学性能变化规律

为了进一步研究光老化后的复合材料的力学性能差异化规律,对光老化后的试样进行动态力学性能分析。图2为添加不同光稳定剂的PE-HD/高岭土复合材料经光老化后的储能模量随温度变化的曲线。

由图2可见,各复合材料试样的储能模量均随着温度的升高而下降。这是因为低温时分子运动困难,材料表现较大的刚性。随着温度升高,分子运动加剧,PE-HD链间可滑动性增加,刚性减弱,材料表现较大的柔性^[12]。但添加不同光稳定剂的复合材料在相同的温度下,储能模量表现出较大的差异化。没有添加抗氧剂和光稳定剂的复合材料(S1)具有更高的低温储能模量,而添加光稳定剂292,770,123,994和2020的复合材料表现较低的储能模量,但依次降低。主要原因是光稳定剂提高了复合材料的抗光老化性能,延缓了复合材料老化变脆,提高了材料柔性,光稳定剂的光稳定性越优异,其对应材

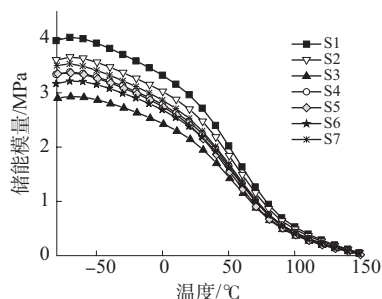
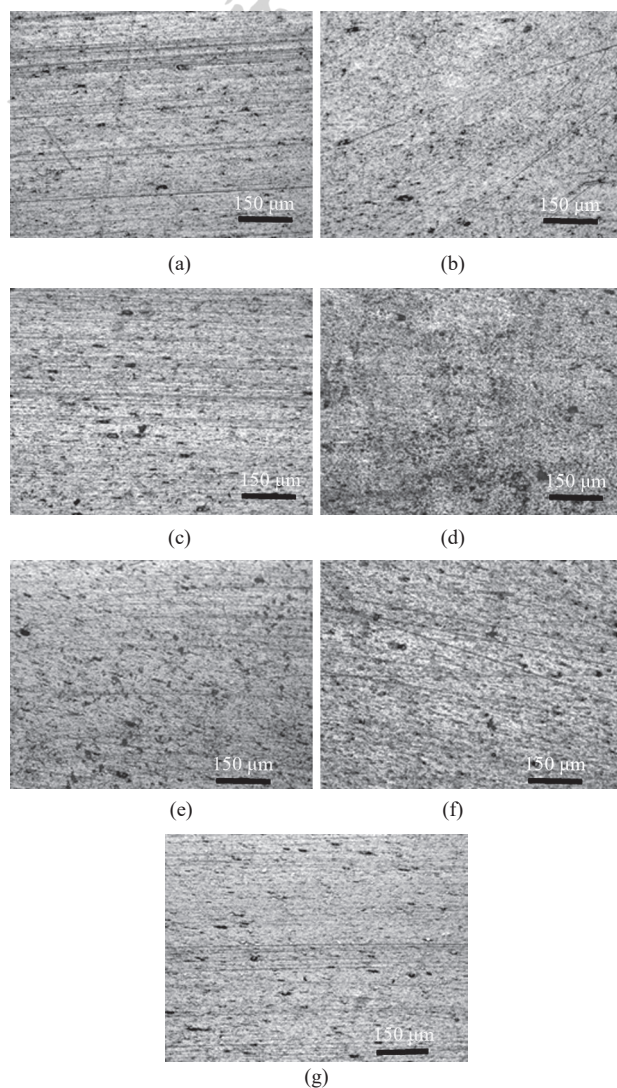


图2 光老化后复合材料的储能模量

料的储能模量越低。在低温段-70~20℃,储能模量的差异表现更为明显,这对于添加不同光稳定剂的材料光老化差异化研究更有指导意义。

2.3 复合材料表面的形貌分析

为了探讨光老化后各复合材料试样的力学性能差异化原因和机理,使用偏光显微镜对光老化后的样条进行形貌表征,如图3所示。从图3照片可以看出,S1~S7样条的偏光显微镜照片上都存在线性划痕,这是由复合材料熔体与模具表面摩擦形成的。光老化后的S1,S2,S3,S6和S7样条表面的异物较少,而光老化后的S4和S5样条表面有明显的异物,尺寸为5~20 μm。这些异物可能是样条在长时间的光老化过程后,添加的助剂发生了析出而形成的,而添加不同光稳定剂的样条助剂析出程度存在差异。



a—S1; b—S2; c—S3; d—S4; e—S5; f—S6; g—S7

图3 光老化后复合材料试样的偏光显微镜照片

2.4 析出物的定性分析

为了对析出物进行定性分析,将各试样表面析出物刮出富集,并进行 ATR-FTIR 测试分析,结果如图 4 所示。由图 4 可知,析出物都含有 720, 1472, 2850 cm^{-1} 和 2919 cm^{-1} 处的特征峰,这些都是 PE-HD 的特征峰,说明在刮取析出物过程中不可避免会引入复合材料基材成分。光老化后 S4 试样的析出物 FTIR 谱图显示,1215 cm^{-1} 和 1153 cm^{-1} 处的峰来源于光稳定剂 770 结构中的 N—C 伸缩振动、C—O 伸缩振动和 C—H 弯曲振动,1720 cm^{-1} 处的峰来源于光稳定剂 770 结构中酯键的 C=O 伸缩振动^[13-15]。光老化后 S5 试样的析出物 FTIR 谱图显示,1153 cm^{-1} 处的峰来源于光稳定剂 123 结构中 N—C 伸缩振动,1720 cm^{-1} 处的峰来源于光稳定剂 123 结构中酯键的 C=O 伸缩振动。光老化后 S7 试样的析出物 FTIR 谱图显示,1169 cm^{-1} 处的峰来源于光稳定剂 292 结构中 N—C 伸缩振动,1720 cm^{-1} 处的峰来源于光稳定剂 292 结构中酯键的 C=O 伸缩振动。另外光老化后 S3, S4, S5 和 S6 试样的析出物在 3598 cm^{-1} 附近有来源于抗氧剂 1010 结构中酚羟基的伸缩振动峰。由此说明,试样 S4, S5 和 S7(分别添加光稳定剂 770, 123, 292)在光老化过程中有明显的光稳定剂析出,这也可由光老化后 S4 和 S5 试样的偏光显微镜测试结果说明,由于光稳定剂 292 在常温下为液态,故采用偏光显微镜无法对 S7 析出物进行有效的观测。

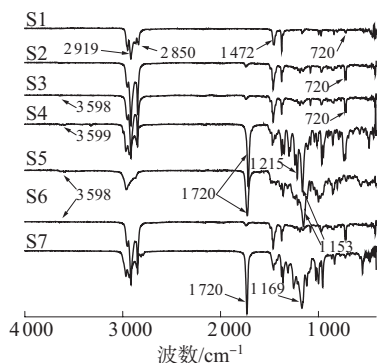


图4 光老化后复合材料试样表面析出物的 FTIR 谱图

对各试样表面析出物进行 $^1\text{H-NMR}$ 分析,结果如图 5 所示,各光稳定剂的结构如图 6 所示。由图 5 分析可知,各试样析出物均在化学位移 $\delta=0.90$ 和 1.25 左右出现特征峰,应是 PE-HD 的 $-\text{CH}_3$ 和 $-\text{CH}_2-$ 特征峰,为基材被刮下所致。S2, S3, S4, S5, S6 和 S7 的析出物出现在 $\delta=7.00$ 左右,应是抗氧剂 1010 和 168 结构中苯环上氢的化学位移,为抗

氧剂析出引入。除以上之外, S4, S5 和 S7 的特征峰与其它组试样存在较大不同。其中,在 δ 为 1.51, 1.80, 2.25 和 5.11(5.18) 处的峰分别来自光稳定剂 770, 123, 292 结构上的 1, 2 和 3 位置上的氢的化学位移, δ 为 3.64 处为光稳定剂 292 结构上的 4 位置上的氢的化学位移^[16-17], 标记如图 6 所示。由此说明,经过光老化后,抗氧剂 1010 和 168 均有所析出,光稳定剂 2020 和 944 未出现明显的析出,而光稳定剂 770, 123, 292 析出明显,故其对应试样在光老化后的力学性能衰减也最为明显。

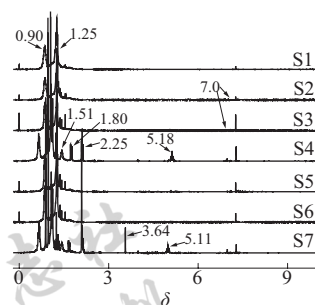


图5 光老化后复合材料试样表面析出物的 $^1\text{H-NMR}$ 谱图

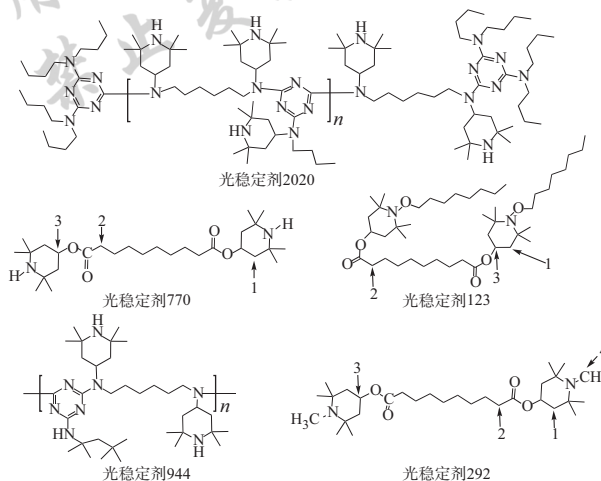


图6 各光稳定剂的化学结构式

2.5 光稳定剂析出机理讨论

在复合材料体系中,光稳定剂起到关键的抗光老化作用。光稳定剂的析出直接导致抗光老化失效,进而导致复合材料的力学性能明显下降^[18]。光稳定剂 770, 123, 292 都是小分子胺类稳定剂,随着温度升高,稳定剂和聚乙烯链运动加剧,小分子稳定剂更容易迁移析出到材料表面^[19-20],出现喷霜现象。光稳定剂 2020 和 944 均为大分子胺类稳定剂,如图 6 所示,两者的重均分子量分别为 2600~3400 和 2000~3000,能很好地与 PE-HD 基体相容,即使分子链运动加剧,也相对较难析出,从而更好地保护复合材料,延缓光辐射对材料的老化。因此,光稳定剂

的析出是导致 PE-HD/高岭土复合材料的抗光老化性能降低的根本原因。

3 结论

(1) 添加光稳定剂 2020 的 PE-HD/高岭土复合材料的力学性能保留率最高,添加光稳定剂 944, 123, 770, 292 的复合材料力学性能保留率依次降低。

(2) 对于不同结构的胺类光稳定剂,其分子量越大越难在光老化过程中析出,光稳定剂 2020 和 944 较难析出,使复合材料表现更优异的抗光老化性能,而光稳定剂 123, 770, 292 更易析出,导致复合材料抗光老化性能降低。同时受阻胺结构更稠密的光稳定剂 2020 表现更好的抗光老化性能。

参考文献

- [1] 申瑞华,宋玲,孙雯,等. HDPE 板衬砌渠道可行性初探[J]. 节水灌溉, 2021(2):87-93.
Shen Ruihua, Song Ling, Sun Wen, et al. Preliminary study on the feasibility of HDPE plate lining channel[J]. Water Saving Irrigation, 2021(2):87-93.
- [2] 张鹏,朱珍珍,朱裕国,等. 高密度聚乙烯的结构与性能分析[J]. 化工技术与开发, 2021, 50(9):31-33, 40.
Zhang Peng, Zhu Zhenzhen, Zhu Yuguo, et al. Analysis of structure and performance of high density polyethylene[J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2021, 50(9):31-33, 40.
- [3] 程海涛,申献双. HDPE 高密度聚乙烯最新改性研究进展[J]. 塑料工业, 2020, 48(2):1-8, 63.
Cheng Haitao, Shen Xianshuang. Progress in the recent modification of HDPE high density polyethylene[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(2):1-8, 63.
- [4] 付海,郑兴莉,刘心韵,等. 钛酸酯偶联剂对磷石膏/HDPE 性能的影响[J]. 塑料, 2020, 49(1):34-38.
Fu Hai, Zheng Xingli, Liu Xinyun, et al. Effect of titanate coupling agent on properties of phosphogypsum/HDPE[J]. Plastics, 2020, 49(1):34-38.
- [5] 丁永志,王建,彭炯,等. 高密度聚乙烯单聚合物复合材料的制备及性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(11):131-135.
Ding Yongzhi, Wang Jian, Peng Jiong, et al. Preparation and properties of high density polyethylene single polymer composites[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2019, 35(11):131-135.
- [6] 岂林霞,王克俭,孙小杰,等. 交联聚乙烯回收料填充高密度聚乙烯的发泡特性[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(5):76-83.
Qi Linxia, Wang Kejian, Sun Xiaojie, et al. Foaming Characteristics of recycled crosslinked polyethylene filled high density polyethylene[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2019, 35(5):76-83.
- [7] 赵博,杜君楠,江李贝,等. 甲基化木粉与 PE-g-MAH 对木粉/HDPE 复合材料力学性能的协同作用研究[J]. 塑料工业, 2021, 49(2):133-138.
Zhao Bo, Du Junnan, Jiang Libei, et al. Synergistic effect of methylated wood powder and PE-g-MAH on mechanical properties of wood flour/HDPE composite[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(2):133-138.
- [8] 王敏,宁莉萍,王彩云,等. 化学镀竹粉/HDPE 复合功能材料的性能研究[J]. 塑料工业, 2020, 48(10):128-133.
Wang Min, Ning Liping, Wang Caiyun, et al. Research on properties of Ni-Fe-P ternary electroless coated bamboo-HDPE composites[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(10):128-133.
- [9] 董一夫,黄元飞,钟菲,等. 聚乙烯/高岭土复合材料的制备及性能[J]. 塑料, 2021, 50(1):54-57.
Dong Yifu, Huang Yuanfei, Zhong Fei, et al. Preparation and properties of polyethylene composite with filling kaolin[J]. Plastics, 2021, 50(1):54-57.
- [10] 申朋龙,倪爱清,王继辉,等. 膨胀阻燃高密度聚乙烯抗紫外老化改性[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(8):110-117.
Shen Penglong, Ni Aiqing, Wang Jihui, et al. Anti-ultraviolet aging modification of expanded flame-retardant high-density polyethylene[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2021, 37(8):110-117.
- [11] 于瑶瑶. 聚乙烯塑料的改性及应用研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2020.
Yu Yaoyao. Study on modification and application of polyethylene plastics[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2020.
- [12] 杨有财,陈卫东. 低温聚乙烯防护层专用料 DMA 性能研究[J]. 石油工程建设, 2021, 47(2):56-59.
Yang Youcai, Chen Weidong. Dynamic mechanical analysis performance of low temperature polyethylene protective layer[J]. Petroleum Engineering Construction, 2021, 47(2):56-59.
- [13] 杜冬冬,刘欢,马若愚,等. 基于分子间作用力组装的镁铝水滑石光稳定剂及其性能研究[J]. 化工学报, 2021, 72(6):3 095-3 104.
Du Dongdong, Liu Huan, Ma Ruoyu, et al. Performance of MgAl layered double hydroxides light stabilizer assembled via intermolecular forces[J]. CIESC Journal, 2021, 72(6):3 095-3 104.
- [14] 刘文君,任显诚. 高分子量受阻胺光稳定剂的合成及其在 PBS 中的应用[J]. 塑料工业, 2019, 47(2):14-19.
Liu Wenjun, Ren Xiancheng. Study on the synthesis of high molecular weight hindered amine lighter stabilizers and its application in poly(butylene succinate)[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(2):14-19.
- [15] 郑秋阁,范晶晶. 红外光谱法测定聚烯烃中抗氧剂 1010 的含量[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(3):25-28.
Zheng Qiukai, Fan Jingjing. Determination of antioxidant irganox 1010 in polyolefin by infrared spectrometry[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2019, 38(3):25-28.

- [16] 李坤泉,柴生勇,李积德,等.受阻胺光稳定剂 770 的合成与应用研究[J].合成材料老化与应用,2019,48(5):1-5,58.
Li Kunquan, Chai Shengyong, Li Jide, et al. Study on the preparation and application of the hindered amine light stabilizer 770[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2019, 48(5):1-5, 58.
- [17] 戴立起,李邦.英力士高密度聚乙烯装置 V3001 结块的分析[J].石油化工,2021,50(3):268-273.
Dai Liqi, Li Bang. The analysis of V3001 agglomerations of Innovene S HDPE plant[J]. Petrochemical Technology, 2021, 50(3):268-273.
- [18] 蒋小良,曾铭,郭敏,等.食品塑料包装材料中光稳定剂 HS-770 迁移量测定及迁移规律研究[J].中国口岸科学技术,2021,3(6):60-64.
Jiang Xiaoliang, Zeng Ming, Guo Min, et al. Study on migration amount determination and migration law of light stabilizers HS-770 in food plastic packaging materials[J]. China Port Science and Technology, 2021, 3(6):60-64.
- [19] 李杰.抗氧剂、光稳定剂在聚碳酸酯和改性材料中的应用技术[J].塑料助剂,2021(1):1-6.
Li Jie. Application of antioxidants and light stabilizers in polycarbonate and modified materials[J]. Plastic Additives, 2021(1):1-6.
- [20] 卢祉巡,于海佳,董薇.受阻胺光稳定剂作用机制及其适用性研究综述[J].塑料科技,2019,47(4):98-102.
Lu Zhixun, Yu Haijia, Dong Wei. Research review on mechanism and applicability of hindered amine light stabilizer[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(4):98-102.

(上接第 137 页)

- [11] Bhaumick P, Jana A, Choudhury L H. Synthesis of novel coumarin containing conjugated fluorescent polymers by Suzuki cross-coupling reactions and their chemosensing studies for iron and mercury ions[J]. Polymer, 2021, 218. DOI:10.1016/j.polymer.2021.123415.
- [12] Badekar P S, Thakur G C N, Varma M E, et al. Rhodamine-based fluorescence 'Turn-On' chemosensor: Detection of Fe^{3+} ion in aqueous medium and MCF-7 live cells[J]. ChemistrySelect, 2021, 6(9):2373-2378.
- [13] Teshima Y, Saito M, Mikie T, et al. Bithiazole dicarboxylate ester: An easily accessible electron-deficient building unit for π -conjugated polymers enabling electron transport[J]. Macromolecules, 2021, 54(7):3489-3497.
- [14] Huang J Y, Yu G. Structural engineering in polymer semiconductors with aromatic *N*-heterocycles[J]. Chemistry of Materials, 2021, 33(5):1513-1539.
- [15] Handrea-Dragan M, Botiz I. Multifunctional structured platforms: From patterning of polymer-based films to their subsequent filling with various nanomaterials[J]. Polymers, 2021, 13(3). DOI:10.3390/polym13030445.
- [16] Park J, Han S, Park H, et al. Simultaneous measurement of glass-transition temperature and crystallinity of as-prepared polymeric films from restitution[J]. Macromolecules, 2021, 54(20):9532-9541.
- [17] Bauri J, Choudhary R B, Mandal G. Recent advances in efficient emissive materials-based OLED applications: A review[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(34):18837-18866.
- [18] Champion A, Metral B, Schuller A S, et al. A simple and efficient model to determine the photonic parameters of a photopolymerizable resin usable in 3D printing[J]. ChemPhotoChem, 2021, 5(9):839-846.
- [19] Liang H, Zheng Z Q, Zhang Q J, et al. Radiative properties of $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{Phen}$ -doped poly(methyl methacrylate)[J]. Journal of Materials Research, 2003, 18:1895-1899.