

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.07.019

玻纤增强尼龙6热带海洋气候环境适应性

李春松¹,何杰¹,洪王胜¹,梁旭¹,茅燕燕¹,郭红枫¹,郭立鹏²,刘苏芹¹

(1.余姚中国塑料城塑料研究院有限公司,浙江宁波 315400; 2.北京欧波同光学技术有限公司,北京 100000)

摘要:在海南某环境试验站开展5年的玻璃纤维(玻纤)增强尼龙6材料环境适应性试验。试验周期内,户外样品的外观颜色、力学性能和热力学性能均有显著变化。通过颜色测量和色差计算分析、表面形貌分析、表面元素分析、力学性能测试、断面形貌分析、热分析等技术手段,对比分析环境试验前后样品性能退化程度和变化原因。结果显示,户外样品颜色变化主要体现在明度降低和色相变化,表面应力开裂、浮纤、盐雾富集、亚甲基氧化生成生色基团是主要影响因素;在户外环境下2~3年周期内,材料低温断裂形貌发生韧-脆转变,玻纤与基体树脂界面作用力弱化;户外试验末期样品的热力学性能显著降低,尼龙6分子已经发生显著的断链和降解,试样表面更为显著。

关键词:玻纤增强尼龙6;热带海洋气候;环境适应性;性能退化

中图分类号:TQ327.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2020)07-0100-06

Environmental Adaptability of Glass Fiber Reinforced PA6 in Tropical Ocean Climate

Li Chunsong¹, He Jie¹, Hong Wangsheng¹, Liang Xu¹, Mao Yanyan¹, Guo Hongfeng¹, Guo Lipeng², Liu Suqin¹

(1. Yuyao Plastics City of China Research Institute, Ningbo 315400, China; 2. Beijing Obo Tong Optical Technology Co., Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract: A five-year environmental adaptation test of glass fiber reinforced nylon 6 material was carried out at an environmental test station in Hainan province. During the test cycle, the appearance color, mechanical properties and thermodynamic properties of outdoor samples varied significantly. Through color measurement and color difference calculation, surface morphology analysis, surface element analysis, mechanical performances testing, fracture surface morphology analysis, thermal analysis and other technical means, the performance degradation degree and the change causes of the samples before and after environmental tests were comparatively analyzed. The results show that the color change of outdoor sample mainly reflects in the reduction of lightness and hue change, surface stress cracking, fiber emergence on the surface, salt spray enrichment, methylene oxidation generating chromogenic group are the main influencing factor. In the outdoor environment for 2~3 year cycle, the change of fracture surface morphology at low temperature of the material is ductile-brittle fracture transition, the interface force of fiber and resin is weakened, the thermodynamic performances of the sample are significantly reduced in the end of outdoor test, chain broken and degradation of nylon 6 molecules are significantly occurred, which is more significant on the sample surface.

Keywords: glass fiber reinforced nylon 6; tropical ocean climate; environmental adaptability; performance degradation

玻璃纤维(玻纤)增强尼龙是一种应用极广泛的热塑性工程塑料,具有较高的性价比^[1-2]。由于含有亲水性的酰胺基团,尼龙较容易吸水和水解,造成性能退化^[3-4]。尼龙的环境适应性评价主要关注热老化^[5-9]、湿老化^[10]和光老化^[11-12]。在材料实际的应用过程中,环境因素的影响十分复杂,实验室加速老化试验往往不能反映实际综合环境因素的影响结果。笔者研究针对热带海洋气候条件,在海南某试

验站开展为期5年的材料环境适应性试验,考察热带海洋气候条件对玻纤增强尼龙6材料性能影响,分析材料自然环境性能退化的主要原因和进程。

1 实验部分

1.1 主要原材料

尼龙6切片:YH800,岳阳石化股份有限公司;
增容剂:N493D,陶氏杜邦股份有限公司;
抗氧剂:1098,巴斯夫化学品公司;

通讯作者:李春松,本科,副研究员,主要从事聚烯烃、尼龙改性应用研究 E-mail:15057427253@163.com

收稿日期:2020-05-27

引用格式:李春松,何杰,洪王胜,等.玻纤增强尼龙6热带海洋气候环境适应性[J].工程塑料应用,2020,48(7):100-105,110.

Li Chunsong, He Jie, Hong Wangsheng, et al. Environmental adaptability of glass fiber reinforced PA6 in tropical ocean climate[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(7): 100-105, 110.

抗氧剂: 168,巴斯夫化学品公司;
光稳定剂: UV327,巴斯夫化学品公司;
成核剂: P22,布吕格曼化工有限公司;
黑色母粒: NU2014,卡博特化工有限公司;
偶联剂: KH550,道康宁化工有限公司;
玻纤: HP3610,PPG 工业公司。

1.2 主要设备及仪器

自动加料挤出系统: STS-50 型,科倍隆(南京)机械有限公司;

注塑机: YH-30 型,宁波海天机电有限公司;

电子万能试验机: CMT5205 型,美特斯工业系统有限公司;

简支梁冲击试验机: XJJ-50 型,承德市世鹏检测设备有限公司;

扫描电子显微镜(SEM)(附带能谱仪): EM30PLUS 型,北京欧波同光学技术有限公司;

傅立叶变换红外光谱(FTIR)仪: Nicolet6700 型,美国赛默飞世尔公司;

差示扫描量热(DSC)仪: TGA/DSC 1/1100 型,梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司;

分光测色仪: CM-5 型,上海精密仪器仪表有限公司。

1.3 试样制备

将尼龙6树脂、增容剂、抗氧剂、抗光老化剂、成核剂、黑色母粒、偶联剂、玻纤等原料分别加入失重式喂料系统,在同向双螺杆挤出机熔融挤出造粒,挤出机各段温度 230~265℃,制得玻纤增强尼龙6材料。

将玻纤增强尼龙6材料在 105℃鼓风干燥 8 h,注射成型试样,注塑机各段温度为 245,260,270,275,270℃,注塑压力 600 MPa,注射速度为最大注射速度的 50%,保压时间 30 s,模具温度 100℃。试样在常温常湿条件下调节 48~96 h。

1.4 环境试验

户外样品分别按同一方向固定放置于东海岸环境实验台上,试样间隔不小于 0.1 m,试验台底座南向倾斜 30°。库内样品放置于距海岸线 500 m 的仓库内。分别在试验开始,1 a,2 a,3 a,4 a,5 a 进行取样检测。

1.5 性能测试与表征

采用分光测色仪对样品进行颜色测量,试片在各个方向上测量长度不小于 8 mm,以确保试片能够完全覆盖测量孔,光源 D65,观察角度 10°。

按照式(1)计算样品环境试验不同时间的总色差 ΔE :

$$\Delta E = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{1/2} \quad (1)$$

式中: ΔL ——明暗度变化;

Δa ——红绿变化;

Δb ——黄蓝变化。

采用 SEM 及附带能谱仪进行形貌分析和元素分析。将样品用导电胶粘贴于样品台上,氮气吹扫表面或断面,真空处理 5 min,用离子溅射仪进行喷金处理,将样品台放入 SEM 进行观测,扫描电压 15~20 kV,放大倍数 500~1000 倍。

拉伸性能按 GB/T 1040.2-2006 测试,拉伸速率 10 mm/min,1A 型试样。

缺口冲击强度按 GB/T 1843-2008 测试,A 型试样。

弯曲性能按 GB/T 9341-2008 测试,测试速率为 2 mm/min。挠度是 6 mm。

FTIR 表征按照 GB/T 6040-2019 进行,采用衰减全反射(ATR)法。

DSC 试验按照 GB/T 19466.3-2004, GB/T 19466.4-2016 进行,起始温度 50℃,终止温度 800℃,升温速率 20℃/min, N_2 气氛。

2 结果与讨论

2.1 外观变化及分析

环境试验的样品中,库内样品外观无明显变化,户外样品则变化明显。以试验初始样品为对比样品,采用颜色测量和色差计算表征各阶段户外样品的颜色变化。以表面形貌观测和成分检测分析户外样品颜色变化原因和机理。

(1) 颜色变化。

户外环境试验的样品外观变化主要体现在光泽度变差,表面龟裂和浮纤。用分光测色仪测量各阶段样品的明度 L 和颜色 a, b ,测量结果见表 1。

表 1 颜色测量结果

时间/a	L (D65)	a (D65)	b (D65)
0	24.56	-0.15	-0.7
1	22.61	0.11	0.78
2	21.22	0.21	1.13
3	19.85	0.29	1.21
4	18.87	0.38	1.39
5	18.29	0.48	2.25

以初始样品为对比样,计算各阶段样品与初始样品的色差值,计算结果见表 2。

由表 1 可见,户外样品 L 值呈逐年降低趋势, a, b 呈现总体上升趋势。由表 2 可见, ΔL 为负值,说

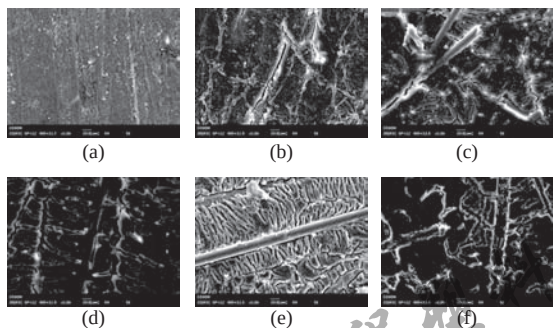
明样品被检测面明度降低, Δa 、 Δb 为正值,说明样品检测面发生一定的红变和黄变,且黄变程度更高。

表2 色差计算结果

时间/a	ΔL	Δa	Δb	ΔE
0	0	0	0	0
1	-1.95	0.26	1.48	2.46
2	-3.34	0.36	1.83	3.83
3	-4.71	0.44	0.91	4.82
4	-5.69	0.53	0.74	5.76
5	-6.27	0.63	2.95	6.96

(2) 表面形貌变化。

以户外样品的上表面作为观测面进行 SEM 观测。将试样切割成边长 5 mm 样品,用 SEM 观测,放大 1000 倍,表面形貌的 SEM 照片如图 1 所示。



时间: a—0 a; b—1 a; c—2 a; d—3 a; e—4 a; f—5 a

图1 户外样品表面形貌($\times 1000$)

表面形貌特征显示,户外样品表面均呈现一定的环境损伤特征,损伤形貌主要体现为纤维浮出、纤维脱落和应力开裂,损伤程度逐年增加。应力裂纹生成方向与纤维取向具有一定相关性。纤维应力开裂的主裂纹沿纤维外缘生成、发展,当裂纹宽度超过纤维直径时,纤维从裂纹中剥离或脱落。纤维与基体树脂线胀系数存在显著差异,交变温度下,微裂纹沿纤维两侧垂直生成和发展。纤维浮出、纤维脱落和应力开裂均会造成表面粗糙度提高,明度降低,在颜色测量中显示为 L 值降低。

(3) 表面成分变化。

采用 ATR-FTIR 和能谱测量样品表面化学成分组成,对比试验初始样品与户外 5 a 样品表面成分差异,初始样品和户外 5 a 样品 FTIR 谱图见图 2。

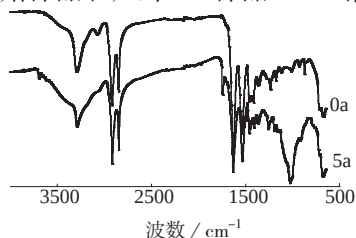


图2 初始样品和户外 5 a 样品 FTIR 谱图

图中上曲线为初始样品 FTIR 谱图,下曲线为户外 5 a 样品 FTIR 谱图。FTIR 谱图中 3290 cm^{-1} 附近是酰胺 N—H 伸缩振动峰, 3080 cm^{-1} 附近是 C—H 伸缩振动峰, 2934 cm^{-1} 附近为 CH_2 反对称伸缩振动峰, 2861 cm^{-1} 附近为 CH_2 对称伸缩振动峰, 1630 cm^{-1} 附近为酰胺基 C=O 伸缩振动峰, 1540 cm^{-1} 附近为酰胺 N—H 弯曲振动峰, 1463 cm^{-1} 附近为 CH_2 反对称弯曲振动峰, 1372 cm^{-1} 附近为 CH_2 对称剪式振动峰, 1264 、 1201 、 1170 cm^{-1} 附近为 C—C 骨架伸缩振动峰。

FTIR 谱图对比结果显示,户外 5 a 样品表面官能团发生显著变化。首先 3290 cm^{-1} 附近酰胺 N—H 伸缩振动谱带减弱,说明酰胺 N—H 间氢键缔合减弱,符合尼龙吸水后氢键键合弱化特性。 3080 cm^{-1} 附近的 C—H 伸缩振动谱带减弱,判断为聚酰胺分子中部分亚甲基氧化脱氢。 1750 cm^{-1} 附近生成 C=O 特征峰,验证了亚甲基氧化脱氢的发生, 1540 cm^{-1} 附近酰胺 N—H 弯曲振动谱带略有增强,说明 N—H 间氢键减弱, N—H 键弯曲自由度增强,验证了 N—H 间氢键缔合减弱的事实。户外样品 1030 cm^{-1} 附近生成 Si—O 特征谱带,说明样品表面有显著的玻纤浮出, 3695 cm^{-1} 附近为玻纤表面的游离—OH,说明玻纤外露与游离水键合。样品均有纤维浮出特征,符合颜色测量和 SEM 观测结果。户外样品呈现一定的氧化趋势,氧化生成基团主要为羰基和醛基,是样品黄变和红变的主要原因,颜色测量中显示为 b 和 a 增大。

图 3 和图 4 分别为环境试验初始样品和户外 5 a 样品的表面能谱元素种类和元素分布。

试验初始样品表面的主要元素构成为碳元素、氧元素、硅元素、钙元素和铝元素。户外充分暴露后,表面增加了氯元素、钠元素、钾元素和铁元素。其中,碳元素为树脂基体的基本元素。氧元素主要存在于基体树脂和玻纤中。硅元素、钙元素和铝元素分布基本一致,可以认定是玻纤的主要构成元素。氯元素、钠元素和钾元素附着物产生,符合海南沿海地区空气高盐雾、高氯离子含量气相特征。氯元素、钠元素和钾元素分布基本一致,且在纤维外缘和纤维脱落处相对集中,判断为空气或雨水中的氯化钾和氯化钠沿纤维周边应力纹浸入样品表面。氯化钾和氯化钠的附着可造成样品表面失光,颜色测量中体现为明度降低。铁元素分布无规律,应为样品放置固定过程中的锈蚀附着。

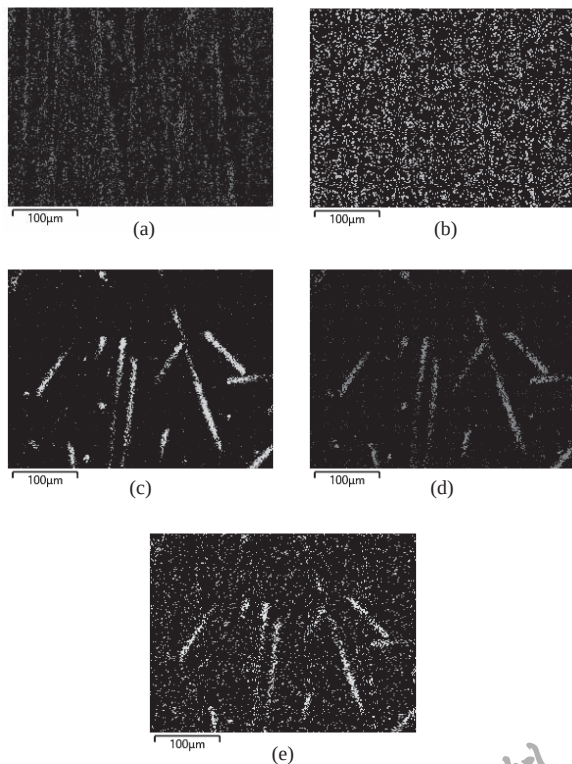
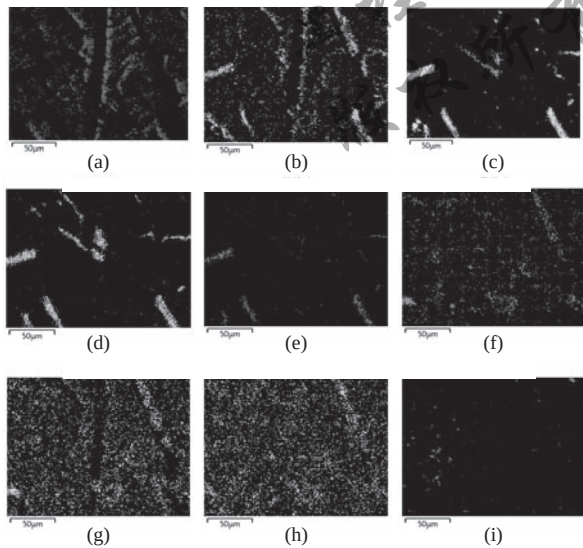


图3 初始样品表面元素种类和元素分布
a—C; b—O; c—Si; d—Ca; e—Al



a—C; b—O; c—Si; d—Ca; e—Al; f—Cl; g—Na; h—K; i—Fe

图4 户外5a样品表面元素种类和元素分布

2.2 力学性能变化及分析

(1) 拉伸性能和弯曲性能变化。

图5和图6分别为库内和户外样品拉伸和弯曲性能变化情况。库内和户外样品在第一年内拉伸强度和定挠度弯曲应力均大幅降低,户外样品降幅更为显著。在试验周期满2a后,拉伸强度和弯曲应力降幅趋缓。通常,环境湿度是影响聚酰胺材料力

学性能的主要原因。尼龙6中酰胺基团为亲水基团,游离态水分子浸入材料体系后将削弱聚酰胺分子间的氢键键合,造成材料刚性降低,韧性提高。户外样品接触的空气湿度更大,同时接触更多的雨水等液态水侵蚀,因而其吸水效应更加明显,拉伸强度和弯曲应力降低的幅度较库内样品更加显著。

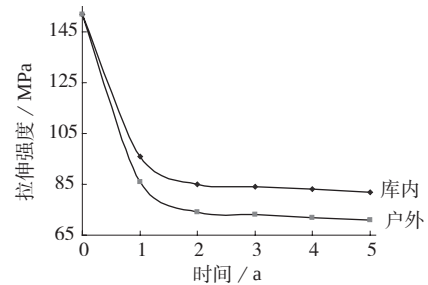


图5 库内和户外样品的拉伸强度

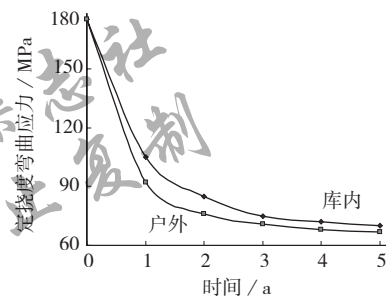


图6 库内和户外样品的定挠度弯曲应力

(2) 冲击性能变化。

图7为库内和户外样品常温下测定的缺口冲击强度变化情况。

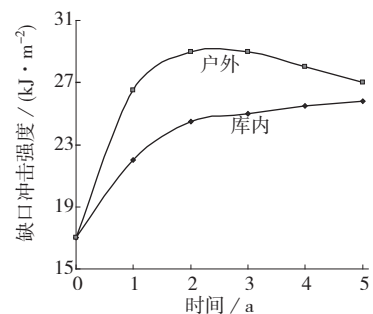


图7 库内和户外样品常温缺口冲击强度变化趋势

库内样品的缺口冲击强度在整个试验周期内逐步提高,其中前2a内增幅较为显著,2a后增幅趋缓。户外样品的缺口冲击强度在试验开始1年内大幅提高,在2a前后达到最大值,然后缓慢降低,在5a试验周期后,户外样品的冲击强度仍高于库内样品,较试验初期样品的冲击强度提高50%以上。

图8为库内和户外样品-30℃条件下测定的低温缺口冲击强度。在整个试验周期内,库内样品的

低温缺口冲击强度逐年提高,但提高幅度明显低于常温缺口冲击强度,说明游离水对尼龙的增塑作用在低温条件下并不显著。户外样品的低温缺口冲击强度在2年内有一定程度提高,然后逐年降低,在第3年后降低幅度逐年增大,结合常温缺口冲击强度的变化趋势,说明材料在时间段内产生明显的环境损伤,游离水的增塑作用不足以弥补材料的低温抗冲击性。

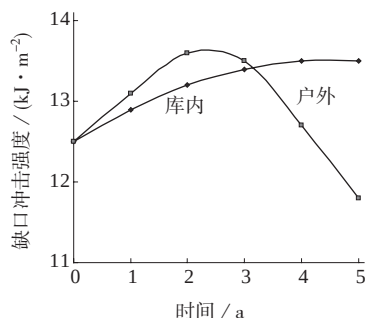
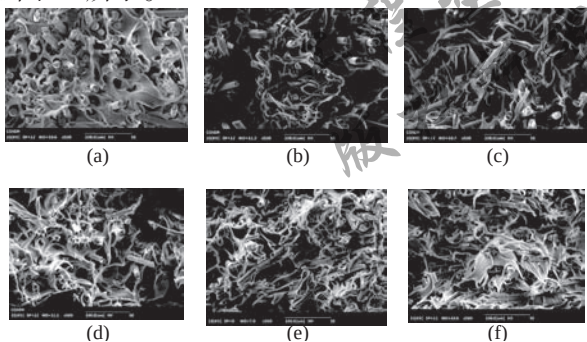


图8 库内和户外样品低温缺口冲击强度变化趋势

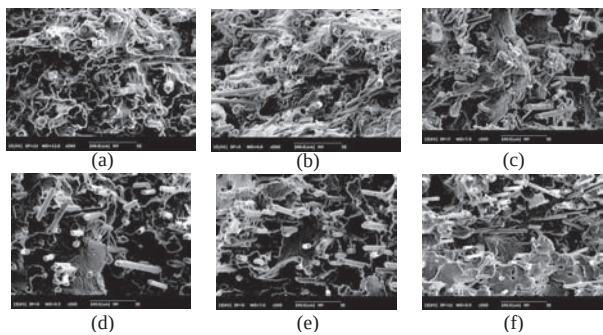
(3) 断面形貌分析。

户外样品的拉伸断面形貌的 SEM 照片如图9所示,户外样品的低温冲击断面形貌的 SEM 照片如图10所示。



a—0 a; b—1 a; c—2 a; d—3 a; e—4 a; f—5 a

图9 户外样品拉伸断面形貌的 SEM 照片 (放大 500 倍)



a—0 a; b—1 a; c—2 a; d—3 a; e—4 a; f—5 a

图10 户外样品低温冲击断面形貌的 SEM 照片 (放大 500 倍)

由图9可见,初始样品的断面处纤维和树脂断裂面较整齐,树脂断面略有塑性形变但不显著,说明

纤维与基体树脂具有较强的界面作用。随着试验周期的增加,拉伸断面处树脂塑性形变更显著,部分区域基体树脂被拉伸为绒毛状、叶片状、倒伞状纤维,同时伴有更多的纤维拔出痕迹,说明基体树脂在游离水的增塑作用下应变性有所增强,同时纤维与基体树脂间界面作用弱化,纤维对树脂形变的束缚作用有所减弱。

由图10可见,初始样品和1 a期样品的断面处纤维和树脂断裂面均较为齐整,基体树脂略有塑性形变,呈韧性断裂特征,说明在这一周期的户外环境中,基体树脂与纤维的界面作用基本未发生变化。2 a期样品的冲击断面出现阶梯状断痕,局部有纤维拔出痕迹,但不显著,断面断裂形貌向脆性断裂特征转变。3 a及后期样品断面出现大面积的平整台阶,符合脆性材料断裂形貌特征,较多的纤维从基体树脂中拔出,且随试验周期增加更加显著,说明纤维与基体树脂的界面作用持续弱化。

2.3 热力学变化及分析

采用 DSC 分析方法,测量分析样品的热力学参数,考察样品在惰性气体环境下熔融和热裂解进程。

图11为初始样品与户外5 a样品的 DSC 曲线。初始样品的 DSC 曲线中有两处显著吸热峰,其中220.1℃处为尼龙6的熔融吸热峰,477.6℃处为尼龙6裂解吸热峰。户外5 a样品的 DSC 曲线中共有三处显著吸热峰,其中217.8℃处为尼龙6的熔融吸热峰,387.4℃和474.5℃处为尼龙6裂解吸热峰。与初始样品相比,户外5 a样品熔融温度和裂解温度均有一定程度的降低,说明样品中尼龙6分子间作用力发生一定程度的弱化。

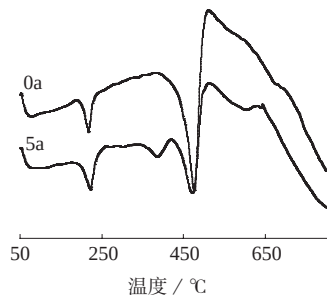


图11 初始样品与户外5 a样品的 DSC 曲线

对吸热峰进行积分和归一化处理,结果见表3。

表3 初始样品与户外5 a样品 DSC 特征吸热参数

DSC 特征吸热参数	初始样品	户外5 a样品
熔融温度 / °C	220.1	217.8
熔融吸热 / (J·g ⁻¹)	45.1	34.6
裂解温度 / °C	477.6	387.4, 474.5
裂解吸热 / (J·g ⁻¹)	421.2	208.4

由表3可见,户外5a样品熔融吸热和裂解吸热的热值明显低于初始样品,其中裂解吸热分裂为两个相对独立的吸热峰,分解温度分别为387.4℃和474.5℃,归一化处理结果显示,两峰的合计热值为208.4 J/g,不足初始样品裂解吸热的50%,说明聚合物内聚能密度明显降低,尼龙6分子已经发生显著的断链和降解。

根据样品颜色测量及表面形貌观测结果,户外样品具有显著的变色、浮纤、应力开裂等老化特征形貌,而热力学分析过程中,户外样品热分解过程呈现明显的双吸热分解峰特征,并且第二分解吸热温度仍为尼龙6分解吸热温度附近。由此推断,样品材料环境损伤过程中,部分聚合物发生老化降解,且降解物应主要分布于样品外表面。刮取户外5a样品表面1mm的老化层样品进行热分析,DSC图谱如图12所示。

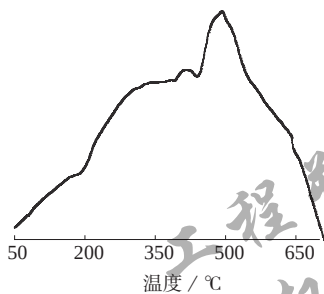


图12 户外5a表面老化层DSC曲线

由图12可见,样品的熔融吸热峰几乎消失,在400℃附近仍有两个不显著的裂解吸热峰,归一化处理结果显示,两峰合计热值为41 J/g,说明户外5a样品表面1mm以内的聚合物结晶性几乎丧失,表面大部分聚合物已分解为无规的低聚物。

3 结论

(1) 试验周期内,玻纤增强尼龙6材料在热带海洋气候户外环境下外观颜色会发生明显变化,其颜色变化主要体现在明度降低,色相由蓝转红、由绿转黄。样品表面应力开裂、浮纤、盐雾富集是明度降低的主要原因,聚合物亚甲基氧化失氢生成新的生色基团是黄变和红变的主要原因。

(2) 力学性能数据表明,库内和户外样品较初始样品均有明显变化,户外样品的变化更为显著,推断游离水的增塑作用是影响材料性能的重要原因。断面形貌分析结论表明,在户外环境下2~3a周期内,材料低温断裂形貌发生脆性断裂转变,玻纤与基体树脂界面作用力弱化,影响玻纤在材料应变过程中对基体树脂的约束作用,造成复合材料的冲击性能

降低。

(3) 热力学分析结果表明,户外试验末期样品的熔融温度、裂解温度、熔融和裂解热值较初始样品均显著降低,说明聚合物内聚能密度明显降低,尼龙6分子已经发生显著的断链和降解。进一步的验证结果证明,户外样品的表面聚合物结晶性几乎丧失,大部分聚合物已分解为无规的低聚物。

参考文献

- [1] 曲日华,王立岩,张龙云,等. 玻璃纤维增强尼龙66 复合材料的结构与性能[J]. 合成纤维工业,2020,43(1):27-31.
Qu Rihua, Wang Liyan, Zhang Longyun, et al. Structure and properties of glass fiber reinforced nylon 66 composite[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2020, 43(1):27-31.
- [2] 汤桂桂. 玻纤增强尼龙6 的断裂研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2018(29):3615.
Tang Guigui. Fracture study of glass fiber reinforced nylon 6[J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2018(29):3615.
- [3] 尹超,孔小东,苏小红. 海水浸泡对增强MC 尼龙力学性能的影响[J]. 广东化工, 2016,43(18):15-17.
Yin Chao, Kong Xiaodong, Su Xiaohong. Studies of properties of the nylon under the condition of seawater[J]. Guangdong Chemical, 2016, 43(18):15-17.
- [4] 王钰. 尼龙6 的改性研究进展[J]. 纺织科学研究, 2020(1):78-80.
Wang Yu. Research progress of the modification of nylon 6[J]. Textile Science Research, 2020(1):78-80.
- [5] 王蒙,宋海硕,郭建兵. 阻燃型玻纤增强尼龙10T 复合材料的热氧老化行为及热降解动力学[J]. 材料导报,2018, 32(8):1344-1351,1356.
Wang Meng, Song Haishuo, Guo Jianbing. Thermo-oxidative aging and thermal degradation kinetics of the flame retardant glass fiber reinforced nylon 10T composites[J]. Material Guide, 2018, 32(8):1344-1351,1356.
- [6] 张海松,成鹏. 基于塑料凸轮用尼龙66 老化研究及使用寿命预测[J]. 合成材料老化与应用,2020,49(1):4-7.
Zhang Haisong, Cheng Peng. Aging research and life prediction of nylon 66 for plastic cam[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2020, 49(1):4-7.
- [7] 肖利群,周雷,李福顺,等. 抗氧化剂对PA6/GF 热氧老化性能的影响[J]. 工程塑料应用,2016,44(10):106-111.
Xiao Liqun, Zhou Lei, Li Fushun, et al. Influence of antioxidant on thermal oxidative aging properties of PA6/GF[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(10):106-111.
- [8] 岑茵,梁惠强,郑一泉,等. 长期热氧稳定玻纤增强PA6 研究[J]. 工程塑料应用,2017,45(4):29-32.
Cen Yin, Liang Huiqiang, Zheng Yiquan, et al. Investigation on long-term thermal oxidative stability of glass fiber reinforced

(下转第110页)

- [3] 徐宜志. 复合绝缘子轮式耐漏电起痕和电蚀损试验[J]. 电网技术, 2005, 29(11): 80-82.
Xu Yizhi. Resistance to tracking-wheel and erosion test for composite insulators[J]. Power System Technology, 2005, 29(11): 80-82.
- [4] 杨涛, 徐东东, 张强, 等. 抗静电阻燃增强 PA6 材料的漏电起痕性能研究[J]. 塑料工业, 2013, 41(2): 115-116.
Yang Tao, Xu Dongdong, Zhang Qiang, et al. Research on the tracking performance of PA6 material reinforced by antistatic flame retardant[J]. China Plastics Industry, 2013, 41(2): 115-116.
- [5] 崔宁, 李杰, 吴鹏飞, 等. 国产聚苯硫醚短纤维的研究开发[J]. 高科技纤维与应用, 2008(6): 23-27.
Cui Ning, Li Jie, Wu Pengfei, et al. Development of domestic polyphenylene sulfide staple[J]. High-Tech Fiber & Application, 2008(6): 23-27.
- [6] 汪家铭. 硫磺延伸产品聚苯硫醚的发展与应用[J]. 化工管理, 2009(7): 23-29.
Wang Jiaming. Development and application of polyphenylene sulfide in sulfur extension products[J]. Chemical Management, 2009(7): 23-29.
- [7] 刘洪, 姜希猛, 李玉凤, 等. 聚苯硫醚的合成方法、工艺及应用研究[J]. 新材料产业, 2019(2): 63-65.
Liu Hong, Jiang Ximeng, Li Yufeng, et al. Synthesis method, processe and application of polyphenylene sulfide[J]. New Materials Industry, 2019(2): 63-65.
- [8] 张浩, 马海燕. 纤维级聚苯硫醚的研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(9): 64-67.
Zhang Hao, Ma Haiyan. The research and development of fiber-grade polyphenyl sulfide[J]. Materials Reports, 2006, 20(9): 64-67.
- [9] 毛维, 易正虎, 李翔翔, 等. 纳米羟基磷灰石 / 聚苯硫醚复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料工业, 2020, 48(3): 104-107.
Mao Wei, Yi Zhenghu, Li Pengxiang, et al. Preparation and properties of nano-hydroxyapatite / poly(1,4-phenylene sulfide) composite material[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(3): 104-107.
- [10] 曹硕, 黄鑫林, 朱姝, 等. 碳纤维增强聚苯硫醚 (CF/PPS) 航空复合材料的结晶行为及力学性能[J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(4): 571-577.
Cao Shuo, Huang Xinlin, Zhu Shu, et al. Crystallization behavior and mechanical properties of carbon fiber-reinforced polyphenylene sulfide (CF/PPS) aeronautical composites[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2019, 37(4): 571-577.
- [11] 潘羽, 丁先锋. 聚苯硫醚 / 玻璃纤维轻质复合材料制备及性能研究[J]. 产业用纺织品, 2019, 37(4): 7-10.
Pan Yu, Ding Xianfeng. Preparation and properties research of polyphenylene sulfide / glass fiber lightweight composites[J]. Technical Textiles, 2019, 37(4): 7-10.
- [12] 曹轶, 杨家操, 王孝军, 等. 具有隔离结构的聚苯硫醚 / 石墨烯纳米片复合材料的制备及电磁屏蔽性能研究[J]. 中国塑料, 2019, 33(8): 1-5.
Cao Yi, Yang Jiacao, Wang Xiaojun, et al. Preparation and electromagnetic interference shielding performance of polyphenylene sulfide / graphene Nano plates composites with segregated structure[J]. China Plastics, 2019, 33(8): 1-5.
- [13] 黄泽彬, 曾德明, 陈瑜, 等. 聚苯硫醚导热改性研究[J]. 广东化工, 2018, 45(9): 47-49.
Huang Zebin, Zeng Deming, Chen Yu, et al. The thermal conductivity modification research of polyphenylene sulfide[J]. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45(9): 47-49.
- [14] 吴健文, 吴清鹤. 特种工程塑料聚苯硫醚的注塑成型技术[J]. 广东化工, 2017, 44(11): 193.
Wu Jianwen, Wu Qinghe. Injection technology of special engineering plastics polyphenylene sulfide[J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(11): 193.
- [15] 刘洪, 崔明现, 姜希猛, 等. 相容剂改性短切玻纤增强聚苯硫醚复合材料性能研究[J]. 塑料工业, 2009, 47(3): 29-31.
Liu Hong, Cui Mingxian, Jiang Ximeng, et al. Study on the properties of glass fiber reinforced PPS composites with compatibilizer modification[J]. China Plastics Industry, 2009, 47(3): 29-31.

(上接第 105 页)

- PA6[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(4): 29-32.
- [9] 覃磊, 赵坤祥, 王耀明. 尼龙护套光缆老化性能研究及使用寿命预测[J]. 现代传输, 2019(6): 49-52.
Qin Lei, Zhao Kunxiang, Wang Yaoming. Research on aging performance and service life forecast of nylon sheath optic cable[J]. Modern Transmission, 2019(6): 49-52.
- [10] 梁惠霞, 崔文广, 苗振巍, 等. 玻纤增强尼龙 6 材料环境吸湿老化研究[J]. 河北化工, 2009, 32(3): 28-29, 77.
Liang Huixia, Cui Wenguang, Miao Zhenwei, et al. Study of aging of environmental moisture on reinforced polyamide 6[J]. Hebei Chemical Engineering and Industry, 2009, 32(3): 28-29, 77.
- [11] 余雯雯, 刘永利, 石建高, 等. 尼龙渔网材料的紫外光老化行为研究[J]. 渔业信息与战略, 2018, 33(4): 267-271.
Yu Wenwen, Liu Yongli, Shi Jiangao, et al. UV aging behavior of nylon nets[J]. Modern Fisheries Information, 2018, 33(4): 267-271.
- [12] 王荣华, 王小燕, 李晖, 等. 玻纤增强尼龙 66 人工加速光老化性能的研究[J]. 化工新型材料, 2015, 43(4): 129-131, 135.
Wang Ronghua, Wang Xiaoyan, Li Hui, et al. Study on the property of glass fiber reinforced nylon 66 composite in accelerated photo-aging[J]. New Chemical Materials, 2015, 43(4): 129-131, 135.