

环境试验与观测

# 聚酰胺工程塑料在典型大气环境中的老化行为和性能变化研究

李茜<sup>1,2</sup>, 郭赞洪<sup>1\*</sup>, 胡涛<sup>1,2</sup>, 王玲<sup>1,2</sup>, 刘溅洪<sup>1,2</sup>, 赵方超<sup>1,2</sup>

(1.西南技术工程研究所 装备环境工程研究中心, 重庆 400050;

2.环境效应与防护重庆市重点实验室, 重庆 400050)

**摘要:** **目的** 研究聚酰胺工程塑料在典型大气环境(海洋大气、高原低气压、寒冷低温和干热沙漠)中的老化过程和关键性能的变化,为装备构件用工程塑料的设计和环效应控制等提供数据及理论支撑。**方法** 开展 FRPA6G30B 聚酰胺试样的户外暴露试验,利用力学试验机、光学显微镜和傅里叶红外光谱等工具分析其外观形貌、力学性能、光谱特征等变化。**结果** FRPA6G30B 工程塑料在不同环境自然试验 4 a 后,表现出不同程度变色、粉化和纤维裸露,尤其在万宁和漠河站的外观变化尤为明显。其中,在万宁试验后,试样表面甚至长满了霉菌。此外,外红外光谱分析也揭示了老化迹象,包括特征峰强度减弱和新特征峰的出现。整个试验过程中,样品的力学性能受“吸湿-脱湿”的影响显著。**结论** 不同试验环境下,FRPA6G30B 试样的老化特征和力学性能变化规律相似,老化特征为变色、粉化和纤维裸露。性能变化与材料的“吸湿-脱湿”密切相关,主要有 2 种变化趋势,一是拉伸强度和弯曲强度变化规律表现为短时下降后平缓,下降幅度几乎达到 30%;二是冲击强度和断裂应变变化规律表现为短时骤增后呈起伏波动,上升幅度达到了 100%。

**关键词:** FRPA6G30B 聚酰胺; 自然暴露; 老化行为; 吸湿; 表面形貌; 力学性能; 热分析

中图分类号: TJ04

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)04-0141-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.04.018

## Aging Behavior and Performance Changes of Polyamide Engineering Plastics in Typical Atmospheric Environments

LI Qian<sup>1,2</sup>, GUO Zanhong<sup>1\*</sup>, HU Tao<sup>1,2</sup>, WANG Ling<sup>1,2</sup>, LIU Jianhong<sup>1,2</sup>, ZHAO Fangchao<sup>1,2</sup>

(1. Equipment Environmental Engineering Research Center, Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400050, China; 2. Environmental Effects and Protection of Chongqing Key Laboratory, Chongqing 400050, China)

**ABSTRACT:** The work aims to explore the aging behavior and key performance changes of polyamide engineering plastics in typical atmospheric environments (marine atmosphere, plateau low-pressure atmosphere, cold and low-temperature atmosphere, dry and hot deserts), providing data and theoretical support for the design of engineering plastics for equipment components and environmental effect control. The outdoor exposure test of FRPA6G30B polyamide samples was carried out, and the changes in appearance, morphology, mechanical properties and spectral characteristics of polyamide samples were analyzed by mechanical

收稿日期: 2025-01-16; 修订日期: 2025-03-05

Received: 2025-01-16; Revised: 2025-03-05

引文格式: 李茜, 郭赞洪, 胡涛, 等. 聚酰胺工程塑料在典型大气环境中的老化行为和性能变化研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(4): 141-147.

LI Qian, GUO Zanhong, HU Tao, et al. Aging Behavior and Performance Changes of Polyamide Engineering Plastics in Typical Atmospheric Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(4): 141-147.

\*通信作者 (Corresponding author)

testing machine, optical microscope and Fourier transform infrared spectroscopy. FRPA6G30B engineering plastics appeared to have different degrees of discoloration, chalking and fiber exposure after 4 years of natural testing in different environments, especially in Wanning and Mohe stations, where the surface of the samples was even covered with mold after the test in Wanning. In addition, the infrared spectroscopy also revealed signs of aging, including the weakening of the intensity of the characteristic peaks and the emergence of new characteristic peaks. The mechanical properties of the sample were significantly affected by "hygroscopic absorption-dehumidification" during the whole test. Under different test environments, the aging characteristics and mechanical properties of FRPA6G30B samples are similar, and the aging characteristics are discoloration, chalking and fiber exposure. The change of properties is closely related to the "hygroscopic absorption-dehumidification" of the material, and there are two main change trends, namely that firstly, the tensile strength and flexural strength change law is shown to be flat after a short period of decline, and the decline range is almost 30% and secondly, the change law of impact strength and fracture strain shows that the short-term sudden increase is followed by undulating fluctuations, and the increase reaches 100%.

**KEY WORDS:** FRPA6G30B; natural exposure; aging behavior; hygroscopic absorption; apparent morphology; mechanical properties; thermal analysis

聚酰胺 (PA) 工程塑料通常被称为尼龙, 是一种高性能的热塑性塑料, 不仅具有良好的力学性能、韧性、耐磨性等, 而且还具有无毒、易着色等优点, 是一种具有卓越性能的热塑性聚合物, 通常被用作耐磨、自润滑机械构件, 被广泛应用于航空航天、电气电子、机械设备等行业<sup>[1-4]</sup>。然而, 聚酰胺材料由于分子结构中的酰胺键, 使其具有一定的吸水敏感性<sup>[5-7]</sup>。根据已有的研究显示<sup>[8-13]</sup>, 在高湿的环境下服役时, 材料吸水不仅会带来尺寸及强度的变化, 在温度、光 (主要是紫外光) 以及腐蚀介质的共同作用下, 产生的物理变化还可能引起材料的腐蚀老化, 缩短材料的使用安全性和寿命, 从而影响其在工程上的应用。

针对聚酰胺工程塑料的老化特征及规律, 各界学者已开展了部分相关研究。如杨德模<sup>[14]</sup>对工程塑料在 3 种自然环境中开展暴露试验后, 观察其外观性能变化发现, 所有试样最终均出现不同程度的失光和变色, 部分试样甚至出现黏化、变形、龟裂以及表面粗糙现象。舒颖等<sup>[15]</sup>研究指出, 聚酰胺工程塑料中的酰胺基团是整个分子结构链的薄弱环节, 其材料裂化极易受到热、紫外线和水分等环境因素的影响。赵春玲等<sup>[16]</sup>研究了聚酰胺材料在高温热老化以及吸湿试验后的外观颜色和力学性能变化, 发现长时吸水后, 材料的拉伸强度降低, 但弹性模量和断裂应变增加。李闵等<sup>[17]</sup>通过 2 a 多的自然环境老化曝晒试验, 得出了环境湿度将影响聚酰胺材料老化过程中的力学性能, 同时随着试验时间的延长, 材料表面终会出现不同程度的裂纹。胡行俊等<sup>[18]</sup>在吐鲁番和广州地区开展了几种工程塑料的户外老化, 研究表明, 太阳辐照强会加速材料的老化。当前, 对于聚酰胺工程塑料的研究,

分别以实验室加速试验和短期的自然环境试验为主, 虽已得到较为广泛的老化特征和性能退化认识, 但目前研究开展的试验较窄, 研究范围较为单一, 研究深度较为薄弱。同时, 由于时间和相关成本等问题, 针对聚酰胺在我国典型大气环境中中长期的老化行为研究鲜少。因此, 本文以聚酰胺工程塑料的中长期环境试验为主, 选用 FRPA6G30B 聚酰胺为研究对象, 分别开展了该材料在我国在湿热海洋环境、高原低压环境、干热沙漠环境和寒冷乡村环境等典型大气环境中的老化行为, 研究了工程塑料表观性能、力学性能等变化特征及规律, 为建立典型材料性能退化模型和进一步夯实支撑装备环境适应性正向设计的基础数据资源奠定坚实基础。

## 1 试验

### 1.1 试样

本试验用聚酰胺 (PA) 工程塑料由中蓝晨光单位提供, 其牌号为 FRPA6G30B, GF 的质量分数约 30%。试验试样类型主要为标准拉伸样、弯曲样和冲击样, 样品的具体信息见表 1。

### 1.2 试验环境

由于 FRPA6G30B 聚酰胺塑料的实际使用环境通常为海洋大气、高原低气压、寒冷低温和干热沙漠, 因此本试验设计了该试样在万宁、拉萨、漠河和敦煌的户外大气环境暴露试验, 各试验环境的具体情况见表 2。

表 1 样品详细信息  
Tab.1 Sample detail

| 材料种类     | 材料类型   | 材料牌号      | 样品成分   | GF 质量分数/% | 提供单位 |
|----------|--------|-----------|--------|-----------|------|
| 聚酰胺 (PA) | 增强尼龙 6 | FRPA6G30B | PA6+GF | 30        | 中蓝晨光 |

表 2 典型大气环境试验站环境条件  
Tab.2 Environmental conditions in typical atmospheric environment test station

| 试验站 | 编号 | 年总辐射量/<br>(MJ·m <sup>-2</sup> ) | 年降水<br>总量/mm | 平均相对<br>湿度/% | 平均<br>温度/℃ | 最高<br>温度/℃ | 最低<br>温度/℃ | 气候类型  | 表面润湿<br>时间对比 |
|-----|----|---------------------------------|--------------|--------------|------------|------------|------------|-------|--------------|
| 万宁  | W  | 5 953.31                        | 1465.3       | 87           | 25.8       | 38.3       | 9.6        | 湿热海洋  | 高            |
| 拉萨  | L  | 7 638.15                        | 424.7        | 39           | 9.4        | 28.4       | -12.3      | 高原低气压 | 低            |
| 漠河  | M  | 4 744.99                        | 257.6        | 60           | -1.9       | 33.8       | -50.2      | 寒冷低温  | 中            |
| 敦煌  | D  | 6 820.76                        | 10.8         | 29           | 12.5       | 39.4       | -22.0      | 干热沙漠  | 低            |

注: 表面润湿时间仅为 4 个站之间的相对情况。

1.3 检测性能

参照 GB/T 1040.2 《塑料 拉伸性能的测定 第 2 部分: 模塑和挤塑塑料的试验条件》、GB/T 9341 《塑料 弯曲性能的测定》和 GB/T 1043.1 《塑料 简支梁冲击性能的测定 第 1 部分: 非仪器化冲击试验》分别开展塑料的拉伸性能、弯曲性能和冲击性能检测<sup>[19-21]</sup>。

2 结果与分析

2.1 外观形貌

FRPA6G30B 样品随试验时间延长发生的外观形貌变化如图 1 所示, 每幅图中最下方样品为原始样。从图 1 中不难发现, 在海南万宁站试验初期(3

个月), 样品表面开始出现轻微的变色发白现象。随着试验时间的增加, 塑料表面发白现象逐渐加剧, 到试验 1 a 后, 开始出现大量树脂粉化脱落、基体裸露, 这可能与样品在老化过程中发生降解反应等有关。试验至 2 a 后, 样品表面开始长出肉眼可见的青绿色椭圆形霉菌斑。随着试验时间的延长, 试验至 4 a 后, 大量青色霉菌斑沿着拉伸样的标距段逐渐布满整个样品(如图 1d 所示)。分析认为, 温湿度可能导致聚酰胺材料吸湿和软化分解, 与太阳辐照的共同作用下, 聚酰胺起初表现为变色, 主链断裂以及分子量下降, 但材料可能保持较好的力学性能。随着辐照量的增大, 聚酰胺最终发生严重的降解, 甚至改变化学结构, 导致其力学性能下降。另外, 霉菌也可通过生物合成所产生的酶蛋白来促进样品降解, 从而加速试样老化。

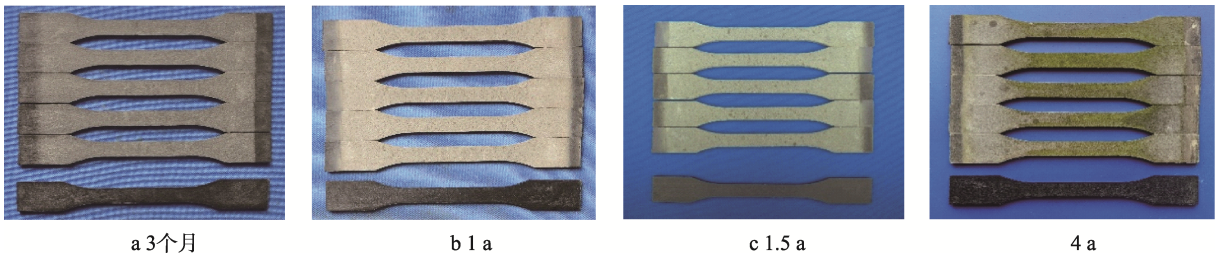


图 1 FRPA6G30B 样品在万宁站随试验时间延长发生的外观形貌变化  
Fig.1 Appearance and morphology changes of FRPA6G30B at Wanning station with the extension of the test time:  
a) three months; b) 1 a; c) 1.5 a; d) 4 a

FRPA6G30B 样品在不同试验环境下不同试验周期中的外观形貌变化如图 2 所示。结果表明, 试验 6 个月, 敦煌站试验后的样品轻微变色发白, 其他各试验环境下样品均出现了明显的老化褪色, 样品的颜色均由原来的黑色转变为灰白色。观察 FRPA6G30B 样品在各个环境下试验 2 a 后(见图 2b)的外观形貌不难发现, 在 4 种大气环境下试验后的试样老化褪色严重, 褪色程度一致, 均呈现出肉眼可见的发白。到试验 4 a 后, 各站试验后的 FRPA6G30B 样品均出现了明显的树脂粉化脱落, 进而基体裸露现象, 但程度有所差异, 其中以漠河户外和万宁户外样品老化较为严重。进一步观察了漠河和万宁户外试验 4 a 后的样品表面(见图 3), 在漠河试验 4 a

后的样品树脂完全粉化脱落, 基体裸露并伴随非均匀的蚀坑大小不一地分布在其表面。万宁户外因“三高一强”的环境因素特点<sup>[22-23]</sup>, 长期作用下, 在试验 4 a 样品表面长满了绿色的绒毛状霉菌, 均匀覆盖在样品表面。另外, 敦煌站因常年的风沙环境, 试验 4 a 后的 FRPA6G30B 样品表面沉积了一层厚厚的风沙, 故样品表面的颜色开始发黄。

2.2 微观形貌

为了进一步清楚地观察到 FRPA6G30B 样品在整个试验周期中的微观形貌演变过程, 重点选取了万宁试验站 3 a 期间的样品进行了不定期的微观形貌观察, 如图 4 所示。通过观察样品在不同周期试验后

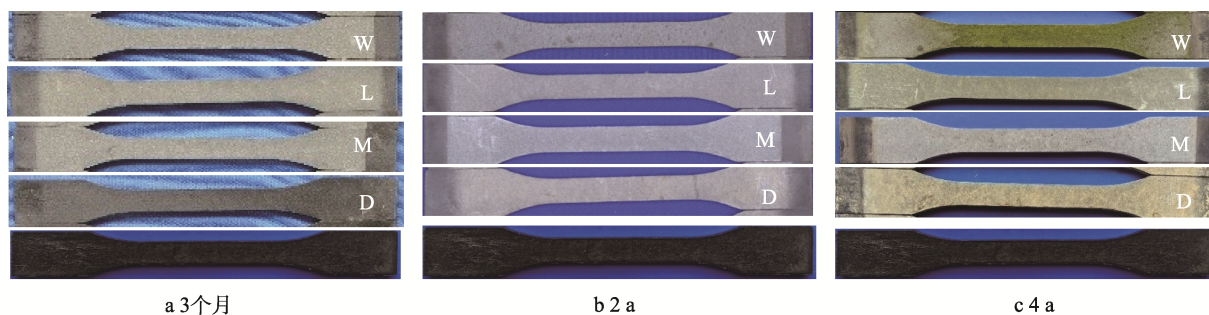


图2 FRPA6G30B 样品在不同试验环境下不同试验周期的外观形貌变化

Fig.2 Appearance and morphology changes of FRPA6G30B in different test environments for different time: a) three months; b) 2 a; c) 4 a

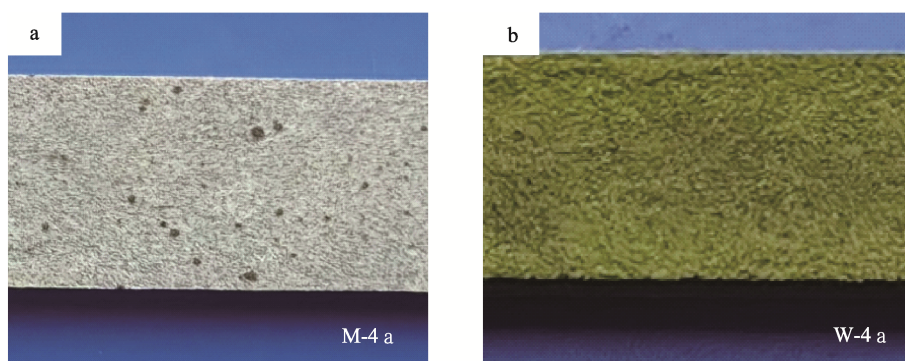


图3 FRPA6G30B 样品在典型大气环境下暴露后的外观形貌

Fig.3 Appearance and morphology changes of FRPA6G30B after exposure in typical atmospheric environment

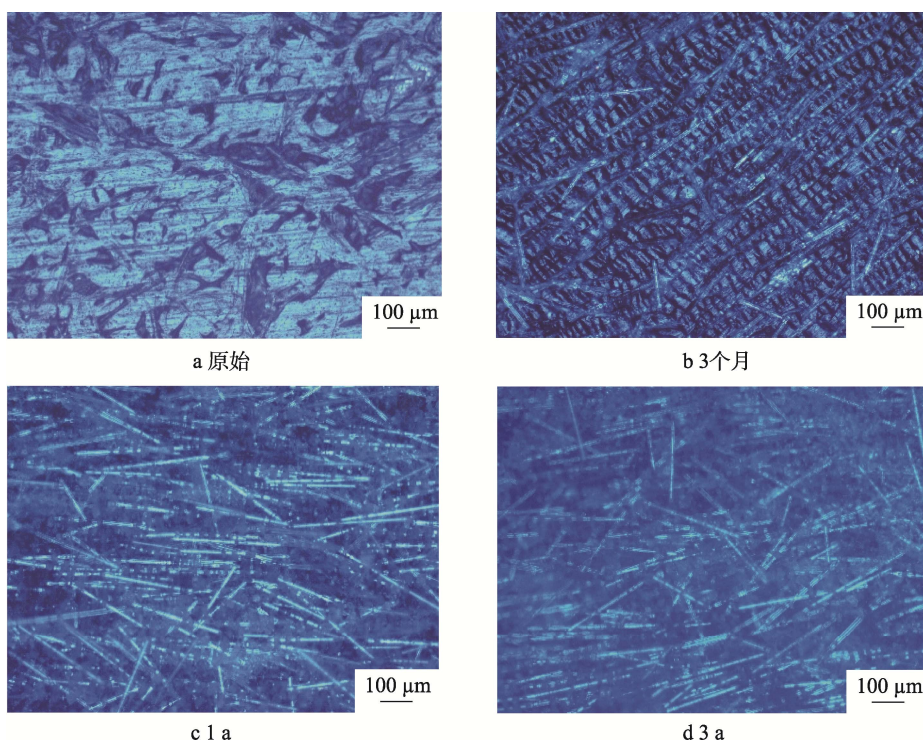


图4 FRPA6G30B 样品在万宁站随试验时间延长发生的微观形貌变化

Fig.4 Microscopic morphological changes of FRPA6G30B at Wanning station with the extension of the test time: a) original; b) three months; c) 1 a; d) 3 a

的微观形貌发现,原始状态的样品,其表面相对光滑平整,玻纤被紧密包裹在树脂基体中,无明显裂纹缺陷;试验初期(3个月),样品开始受到破坏,

表面出现了明显裂纹,整个树脂基体发生大面积(90%以上)龟裂,并伴随极少量的纤维裸露。试验1 a后,样品的龟裂加剧,大量的树脂粉化脱落,同

时也导致纤维进一步裸露, 样品表面的老化逐渐由初始的龟裂向纤维裸露发展。试验 3~4 a 后, 大量的纤维开始裸露于样品表面, 早期龟裂的树脂几乎完全被粉化。随着试验时间的延长, 纤维裸露面积不断扩大, 裸露数量大幅度增多, 最终整个样品表面几乎布满了裸露的纤维。

## 2.3 力学性能

FRPA6G30B 样品经不同试验方式试验 4 a 后的力学性能变化如图 5 所示。结果表明, 不同试验环境下, 样品的各类力学性能变化特点类似, 具体表现为拉伸强度、弯曲强度下降, 而断裂应变、冲击强度上升。总体而言, 万宁和漠河户外样品力学性能的变化幅度相较于其余 2 个试验站的试样更大, 这可能与聚酰胺材料突出的吸湿特性有关<sup>[24]</sup>。酰胺基团中的胺基与羰基易与水分子形成氢键, 导致分子链间作用力下降, 分子链迁移率和柔韧性增加, 进一步引发材料力学性能变化。万宁、漠河地区分别属于湿热海洋和寒冷乡村气候, 相比于拉萨、敦煌地区, 湿度更高, 有利于聚酰胺材料吸收水分子, 更易导致材料力学性能变化。试验 2 a 后, 万宁户外样品拉伸强度、断裂应变、弯曲强度及冲击强度

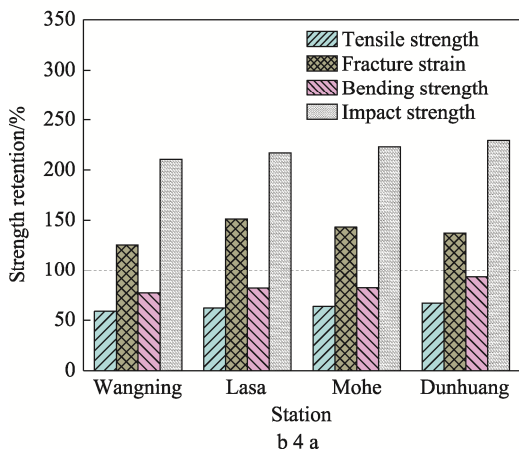
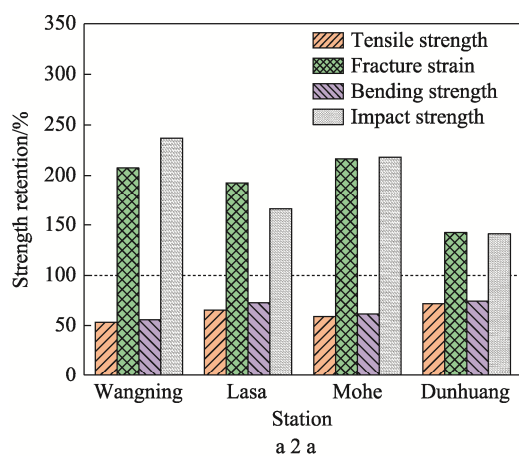


图 5 FRPA6G30B 样品试验后的力学性能变化  
Fig.5 Change in mechanical properties of FRPA6G30B after test

保留率分别约为 53.5%、207.0%、55.8%、237.0%; 试验 4 a 后, 各站样品试验后的拉伸强度和弯曲强度保留率为 60%~70%, 断裂应变和冲击强度保留率均保持在 200%左右。分析认为<sup>[25-26]</sup>, 聚酰胺吸水后期, 水分子可能破坏树脂中的官能团及—CH<sub>2</sub>—O—化学键, 导致材料内部的玻璃纤维网络结构和粒子发生交换反应, 进而引起了拉伸强度和弯曲强度的降低。另外, 聚酰胺在吸水后, 极易发生分子链的重整和组合, 可能会增加分子的柔顺性。这种柔顺性的增加有助于材料在受到冲击时更好地分散应力, 从而提高冲击强度, 在环境中分解时形成新的 C—O 键, 这可能导致材料的整体结构变得更加坚固, 从而增强其冲击强度。

不同试验环境下, 随时间延长, FRPA6G30B 样品的力学性能变化规律类似。以万宁户外样品为例 (如图 6 所示), 其力学性能变化主要分为 2 个阶段: 第 1 阶段为试验短时间内 (3 个月), 样品的拉伸强度和弯曲强度出现明显下降, 下降幅度几乎达到 30%, 这与其宏/微观形貌变化特点及规律一致, 而冲击强度和断裂应变骤增, 上升幅度达到了 100%; 第 2 阶段为试验 3 个月~4 a, 这一过程其拉伸强度和弯曲强度变化不明显, 曲线呈平缓波动, 而冲击强度和断裂应变则随着试验时间的延长上下波动明显, 但依然有较高的性能保留率。分析认为, 受环境四季温湿度交替变化和聚酰胺材料本身较强的吸湿性影响, 样品在试验过程中表现出明显的“吸湿-脱湿”行为, 其冲击强度和断裂应变性能发生波动变化。在湿度较高的环境中, 样品逐渐吸湿饱和, 使得其冲击强度和断裂应变呈现出上升趋势, 但随着温度的升高和环境中的湿度逐渐降低, 样品本身也呈现出“脱湿”现象。当样品的湿度降到一定程度后, 其冲击强度和断裂应变性能出现下降趋势。随着试验的进行, 在温度和湿度以及太阳辐射等多种环境因素的共同作用下, 从力学性能的变化趋势

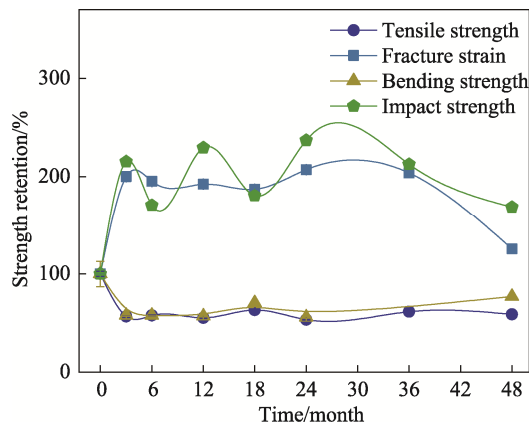


图 6 FRPA6G30B 样品在万宁站随试验时间延长的力学性能变化

Fig.6 Mechanical properties changes of FRPA6G30B at Wanning station with the extension of the test time

不难预测。当试验时间足够长时,受样品表面老化降解,材料内部发生分子链断裂和化学结构变化,所有力学性能最终将呈现下降。

## 2.4 红外光谱

FRPA6G30B 样品在不同试验环境下试验 4 a 后的红外光谱变化如图 7 所示。谱图中 3 290、3 080、2 934、2 861  $\text{cm}^{-1}$  吸收峰分别对应于酰胺 N—H 伸缩振动、C—H 伸缩振动、 $\text{CH}_2$  反对称伸缩振动和  $\text{CH}_2$  对称伸缩振动。1 634、1 537  $\text{cm}^{-1}$  的吸收峰则与酰胺基 C=O 伸缩振动和酰胺 N—H 弯曲振动有关。1 463、1 372  $\text{cm}^{-1}$  对应的吸收峰分别是  $\text{CH}_2$  反对称弯曲振动和  $\text{CH}_2$  对称剪式振动。1 264、1 201、1 170  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰反映了 C—C 骨架伸缩振动。结果表明,试验后样品 3 080  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰峰强减弱,这可能是由于亚甲基氧化脱氢反应的发生。在 1 750  $\text{cm}^{-1}$  处出现了新的 C=O 吸收峰,这也支持了上述的氧化脱氢反应假设。在 1 026  $\text{cm}^{-1}$  处观察到 Si—O 吸收峰的出现,表明样品表面有严重的玻纤裸露现象。

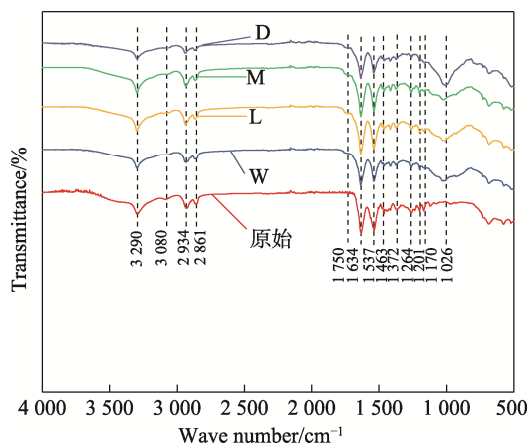


图 7 FRPA6G30B 样品试验前后的红外光谱

Fig.7 Infrared spectra of FRPA6G30B before and after test

## 3 结论

本文针对 FRPA6G30B 聚酰胺工程塑料开展了 4 种典型大气环境下的户外暴露试验,通过宏微观和关键性能变化分析,得出以下主要结论:

1) FRPA6G30B 塑料在海洋大气、高原低气压、寒冷低温和干热沙漠大气环境中自然试验 4 a 后表现出不同程度变色、粉化和纤维裸露,以海洋大气和寒冷低温环境下材料的外观变化最为突出。其中,在海洋大气环境试验后,甚至出现了长满霉菌的现象。

2) 不同试验环境下,FRPA6G30B 塑料随试验时间延长,力学性能变化规律类似,其性能变化与材料的“吸湿-脱湿”密切相关。力学性能变化主要有 2 种趋势:一是拉伸强度和弯曲强度变化规律表现为短时下降后平缓,下降幅度最大可达 30%;二是冲

击强度和断裂应变为短时骤增后呈起伏波动,上升幅度达到了 100%。

3) FRPA6G30B 样品具有较强的吸湿性,“吸湿-脱湿”过程直接影响材料的力学性能和老化行为。因此,在实际应用过程中,需关注湿度对于该种材料的影响,同时在相关制品强度设计时以吸湿平衡后的强度为基础。

## 参考文献:

- [1] 魏运方,陈百军. 聚酰胺工程塑料的发展趋势[J]. 国际化工信息, 2001(2): 10-13.  
WEI Y F, CHEN B J. Development Trend of Polyamide Engineering Plastics[J]. Global Chemical Information, 2001(2): 10-13.
- [2] 姜曼,蔡豪坤,董坚. 聚酰胺酰亚胺材料的合成与应用进展[J]. 化工新型材料, 2014, 42(6): 197-199.  
JIANG M, CAI H K, DONG J. Progress in Synthesis and Application of Poly (Amide Imide) Materials[J]. New Chemical Materials, 2014, 42(6): 197-199.
- [3] 吴国光. 聚酰胺酰亚胺的研发新进展[J]. 信息记录材料, 2011, 12(3): 42-47.  
WU G G. Polyamideimide the Development of New Progress[J]. Information Recording Materials, 2011, 12(3): 42-47.
- [4] HUA Y Z, LI Y Y, JI Z K, et al. Dual-Bionic, Fluffy, and Flame Resistant Polyamide-Imide Ultrafine Fibers for High-Temperature Air Filtration[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 452: 139168.
- [5] THOMAS S N, HRIDAYANATHAN C. The Effect of Natural Sunlight on the Strength of Polyamide 6 Multifilament and Monofilament Fishing Net Materials[J]. Fisheries Research, 2006, 81(2/3): 326-330.
- [6] 陈言臣,沈艺晨. 聚酰胺酰亚胺绝缘涂料吸潮机理及改善探讨[J]. 化工管理, 2020(27): 180-181.  
CHEN Y C, SHEN Y C. Moisture Absorption Mechanism and Improvement Based on Polyamideimide Insulating Varnish[J]. Chemical Enterprise Management, 2020(27): 180-181.
- [7] 刘鑫,陶友季. 湿度对高分子材料机械性能的影响[J]. 广州化工, 2012, 40(23): 29-30.  
LIU X, TAO Y J. Effect of Humidity on the Mechanical Properties of Polymer Materials[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2012, 40(23): 29-30.
- [8] 汪学华. 自然环境试验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.  
WANG X H. Natural Environment Test Technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.
- [9] 郑高飞,亢一澜,富东慧,等. 高分子材料湿度含量对其力学性能的影响的实验研究[J]. 实验力学, 2003, 18(1): 23-28.  
ZHENG G F, KANG Y L, FU D H, et al. An Experimental Research for the Influence of Moisture Content on the Mechanical Properties of Polymer Material[J]. Journal of

- Experimental Mechanics, 2003, 18(1): 23-28.
- [10] 王丹. 湿度对高分子材料机械性能的影响[J]. 科技与创新, 2021(15): 89-90.  
WANG D. Effect of Humidity on the Mechanical Properties of Polymer Materials[J]. Science and Technology & Innovation, 2021(15): 89-90.
- [11] 郑盼. 新型聚酰胺酰亚胺的合成及其应用性能评价[D]. 上海: 东华大学, 2011.  
ZHENG F. Synthesis and application performance evaluation of new polyamideimide[D]. Shanghai: Donghua University, 2011.
- [12] 冯翎翎, 陶华, 张广来. 吸水性对尼龙紧固件拉伸强度的影响[J]. 塑料工业, 2006, 34(1): 47-49.  
FENG H L, TAO H, ZHANG G L. Influence of Water Absorption on Tensile Strength of Nylon Bolt[J]. China Plastics Industry, 2006, 34(1): 47-49.
- [13] 吕桂英, 朱华, 冯雪松, 等. 环境湿度对聚酰胺力学性能的影响及其微观机理探讨[J]. 工程塑料应用, 2006, 34(8): 60-63.  
LYU G Y, ZHU H, FENG X S, et al. The Effect of Environmental Moisture on the Mechanical Properties of Polyamide and Its Micromechanism[J]. Engineering Plastics Application, 2006, 34(8): 60-63.
- [14] 杨德模. 工程塑料自然老化试验研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1994, 6(1): 100-103.  
YANG D M. Atmospheric Weathering Performance of Engineering Plastics[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1994, 6(1): 100-103.
- [15] 舒颖, 叶林, 杨涛. 聚酰胺的长期紫外光氧老化行为[J]. 高分子材料科学与工程, 2008, 24(7): 98-101.  
SHU Y, YE L, YANG T. The Long-Term Ultraviolet-Oxidative Aging Behavior of Polyamide[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2008, 24(7): 98-101.
- [16] 赵春玲, 贾静焕, 王强, 等. 聚酰胺-酰亚胺材料腐蚀及老化特性研究[J]. 失效分析与预防, 2023, 18(2): 88-92.  
ZHAO C L, JIA J H, WANG Q, et al. Corrosion and Aging Characteristics of Polyamide-Imide Materials[J]. Failure Analysis and Prevention, 2023, 18(2): 88-92.
- [17] 李闵, 林安, 朱华等. 聚酰胺及其改性材料自然老化行为研究及预测[J]. 环境技术, 2011(6): 40-43.  
LI M, LIN A, ZHU H, et al. Study on Natural Aging Property And Prediction of PA66 and Glass Fiber Composite Materials[J]. Environmental Technology, 2011(6): 40-43.
- [18] 胡行俊, 伍巧晖, 阳琰, 等. 几种塑料在吐鲁番与广州的户外老化试验[J]. 塑料助剂, 2013(6): 42-44.  
HU X J, WU Q H, YANG Y, et al. Weather Ageing Test of Some Plastics in Guangzhou and Turpan[J]. Plastics Additives, 2013(6): 42-44.
- [19] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 塑料 拉伸性能的测定 第2部分: 模塑和挤塑塑料的试验条件: GB/T 1040.2—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Plastics—Determination of Tensile Properties—Part 2: Test Conditions for Moulding and Extrusion Plastics: GB/T 1040.2—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [20] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 塑料 弯曲性能的测定: GB/T 9341—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Plastics—Determination of Flexural Properties: GB/T 9341—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 塑料 简支梁冲击性能的测定 第1部分: 非仪器化冲击试验: GB/T 1043.1—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Plastics—Determination of Charpy Impact Properties—Part 1: Non-Instrumented Impact Test: GB/T 1043.1—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [22] 李茜, 陈星昊, 胡涛, 等. 某机载印制电路板在模拟海洋大气环境中腐蚀行为[J]. 海军航空大学学报, 2022, 37(6): 486-494.  
LI Q, CHEN X H, HU T, et al. Corrosion Behavior of an Airborne PCB in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. Journal of Naval Aviation University, 2022, 37(6): 486-494.
- [23] 李茜, 胡涛, 孙茂钧, 等. 海洋大气环境多因素组合/综合试验及方法现状分析[J]. 装备环境工程, 2023, 20(3): 84-90.  
LI Q, HU T, SUN M J, et al. Analysis of Multi-Factor Combined/Comprehensive Test and Method in Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(3): 84-90.
- [24] 彭治汉, 施祖培. 塑料工业手册-聚酰胺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.  
PENG Z H, SHI Z P. Handbook of Plastics Industry-Polyamide[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001.
- [25] 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.  
LIANG H X, CUI W G, MIAO Z W, et al. Study of Aging of Environmental Moisture on Reinforced Polyamide 6[J]. Hebei Chemical Engineering and Industry, 2009, 32(3): 28-29.
- [26] 何伟, 李振中, 张文熊. 聚酰胺复合材料增强增韧研究进展[J]. 中国塑料, 2006, 20(3): 1-6.  
HE W, LI Z Z, ZHANG W X. Advance in Research of Toughened and Reinforced Polyamide Composites[J]. China Plastics, 2006, 20(3): 1-6.