

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.01.018

自然老化对 CF/PA66 复合材料力学性能的影响

王先村^{1,2}, 张娟娟^{1,2}, 魏海旭^{1,2}, 胡剑峰^{1,2}, 张贻启^{1,2}

(1. 上海复合材料科技有限公司, 上海 201112; 2. 上海航天树脂基复合材料工程技术研究中心, 上海 201112)

摘要: 目前,对纤维增强聚酰胺复合材料老化行为的研究主要集中在人工加速老化法,利用自然老化法研究纤维增强聚酰胺复合材料老化行为的文献相对较少。为研究纤维增强聚酰胺复合材料在上海地区的自然老化,以短碳纤维增强聚酰胺 66 (CF/PA66) 注塑粒子为原材料,通过注射成型得到 CF/PA66 拉伸样条。在上海地区将 CF/PA66 拉伸样条静置于室内进行为期 36 个月的自然老化试验。通过对自然老化前后的 CF/PA66 进行拉伸、弯曲测试并观察拉伸断口形貌,分析自然老化对 CF/PA66 力学性能、破坏模式及破坏机理的影响。结果表明,经过 36 个月的自然老化,PA66 发生降解,表面发白且出现了粉化现象;CF/PA66 复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度、弯曲模量的保留率分别为 77.27%, 85.59%, 92.18% 和 91.03%, 自然老化后复合材料的弯曲强度、弯曲模量的保留率均高于拉伸强度、拉伸弹性模量的保留率;自然老化并未改变 CF/PA66 的拉伸破坏失效模式、拉伸破坏机理及弯曲破坏机理。但由于自然老化后 CF/PA66 的韧性增加,使得其弯曲破坏失效模式由断裂变为受拉区域出现裂纹。

关键词: 碳纤维;聚酰胺 66;自然老化;注塑成型;复合材料;热塑性树脂

中图分类号: TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)01-0125-08

Effect of natural aging on mechanical properties of CF/PA66 composites

WANG Xianchen^{1,2}, ZHANG Juanjuan^{1,2}, WEI Haixu^{1,2}, HU Jianfeng^{1,2}, ZHANG Yiqi^{1,2}

(1. Shanghai Composite Material Science & Technology Co., Ltd., Shanghai 201112, China;

2. Shanghai Engineering Technology & Research Center of Aerospace Resin Based Composites, Shanghai 201112, China)

Abstract : At present, the research on the aging behavior of fiber-reinforced polyamide composites mainly focuses on artificial accelerated aging method, and there are relatively few literatures on the aging behavior of fiber-reinforced polyamide composites using natural aging method. In order to study the natural aging of fiber reinforced polyamide composites in Shanghai area, short carbon fiber reinforced polyamide 66 (CF/PA66) injection particles were used as raw materials to prepare CF/PA66 tensile splines by injection molding. CF/PA66 tensile splines were placed indoors for 36 months of natural aging test in Shanghai. The effects of natural aging on the mechanical properties, failure mode and failure mechanism of CF/PA66 were analyzed by tensile and bending tests and observation of tensile fracture morphology of CF/PA66 before and after natural aging. The results show that PA66 degrades, and the surface becomes white and powdered after 36 months of natural aging. The retention rates of tensile strength, tensile modulus, bending strength and bending modulus of CF/PA66 composites are 77.27%, 85.59%, 92.18% and 91.03%, respectively. The retention rates of bending strength and bending modulus after natural aging are higher than those of tensile strength and tensile modulus. Natural aging does not change the tensile failure mode, fracture mechanism, or bending failure mechanism of CF/PA66. However, due to the increased toughness of CF/PA66 after natural aging, the bending failure mode of CF/PA66 changes from fracture to crack in the tension region.

Keywords : carbon fiber ; polyamide 66 ; natural aging ; injection molding ; composite material ; thermoplastic resin

随着汽车、船舶、航空航天等行业的发展,结构的轻量化需求不断增加,纤维增强热塑性树脂基复

合材料作为一种轻质高强的新材料,被广泛应用于上述领域^[1-4]。纤维增强热塑性树脂基复合材料是

通信作者: 王先村,硕士研究生,助理工程师,研究方向为纤维增强树脂基复合材料及蜂窝夹层结构复合材料

收稿日期: 2024-11-18

引用格式: 王先村,张娟娟,魏海旭,等. 自然老化对 CF/PA66 复合材料力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(1): 125-132.

WANG Xianchen, ZHANG Juanjuan, WEI Haixu, et al. Effect of natural aging on mechanical properties of CF/PA66 composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(1): 125-132.

以热塑性树脂为基体、高性能纤维为增强相的复合材料,具有轻质高强、可回收利用等优点^[5-7]。其中,经高性能纤维增强后的聚酰胺(即尼龙)复合材料,因具有易加工、耐磨、电绝缘等优点,被广泛应用于各大工业领域^[8-10]。聚酰胺复合材料在服役和储存过程中,会在外部环境因素(比如热、水分、光线、氧气等)的作用下,不可避免地发生老化,造成复合材料使用性能的劣化^[11]。因此,研究纤维增强聚酰胺复合材料的老化行为对其工程应用具有重要意义。

研究复合材料老化行为的方法有两种,第一种是在实验室内进行的人工加速老化法,即利用实验仪器强化复合材料实际应用环境中的某一种或几种老化因素,来研究这些老化因素对复合材料的影响;人工老化加速法可以在短时间内获得实验数据,节省实验的时间成本。第二种是自然老化法,即将复合材料放置于实际使用的自然环境中自然老化;该方法充分地考虑到了实际使用环境中的多种老化因素对复合材料的耦合作用,可以获得更为准确的老化数据^[12-13]。目前对于纤维增强聚酰胺复合材料老化行为的研究主要以人工加速老化实验方法为主,关于自然老化方面的研究比较少。

张伟等^[14]对长玻纤增强尼龙6复合材料进行了油老化加热试验,研究其在23, 50, 80 °C下的力学性能变化,结果表明在油热条件下,长玻纤增强尼龙6复合材料的拉伸强度、弯曲模量与老化时间呈线性下降关系。殷宗莲等^[15]通过注塑成型制备了碳纤维增强尼龙复合材料,研究其在高、低温环境下的抗老化性能,结果表明,该材料在高、低温环境中具有良好的表观稳定性;在低温下24 h后,拉伸强度、冲击强度开始趋于稳定,不再随时间的增加而出现明显下降;但在高温下,该材料在16天后出现明显的热氧老化趋势。宋海硕等^[16]对熔融共混法制备的短玻纤增强尼龙10T进行热氧老化实验,发现热氧老化会降低尼龙树脂与玻璃纤维间的界面强度及复合材料的力学性能,同时影响尼龙大分子链的活动能力。许多学者对纤维增强聚酰胺复合材料进行了湿热加速老化实验,发现水分子会从三方面降低复合材料的力学性能^[17-22]:一是水分子会沿着基体的裂纹、孔洞渗透到复合材料内部,降低了聚酰胺大分子键间作用力;二是水分子会与聚酰胺大分子发生反应,造成树脂基体的降解、摩尔质量下降;三是水分子会破坏纤维与聚酰胺基体间的黏结界

面,造成界面强度下降。水分子对界面的破坏是不可逆的。同时加热会加速、加重水分子对复合材料结构的破坏。但在湿热老化前期,水分子的进入对聚酰胺基体起到了增塑作用,一定程度上提高了复合材料的力学性能。

为研究纤维增强聚酰胺复合材料自然老化下的老化行为,同时充分利用碳纤维边角料,降低经济成本,笔者以短碳纤维增强/聚酰胺66 (CF/PA66)为原材料,通过注塑成型法制备了CF/PA66复合材料拉伸样条,并对其进行36个月的自然老化实验,通过对比自然老化前后CF/PA66的表观、力学性能、破坏模式,分析自然老化对CF/PA66力学性能的影响,可为后续研究CF/PA66的自然老化行为提供数据参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

CF/PA66:碳纤维的质量分数为20%,碳纤维的长度和细度分别为0.5 mm和8 μm,东莞市峰顺工程塑料有限公司。

1.2 主要仪器及设备

微型注塑机:XPM-12X,台州市黄岩星普机械设备有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):TM-3000,日立高新技术(上海)国际贸易有限公司;

万能试验机:Instron 5982,美国英斯特朗公司;

恒温鼓风干燥箱:DHG-9140,绍兴博纬仪器设备有限公司。

1.3 试样制备

CF/PA66注塑粒子的烘料温度为120 °C,烘料时间为4 h。注塑温度为275~295 °C,保压压力60 MPa,保压时间5 s,冷却时间12 s。制得的拉伸样条为拉伸区域10 mm(宽)×4 mm(厚)的狗骨头形样条,具体尺寸如图1所示。

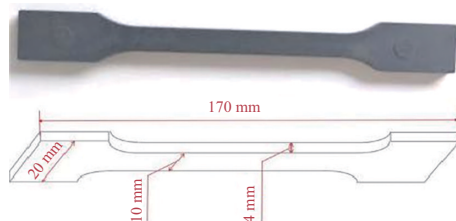


图1 CF/PA66样条实物及尺寸示意图

Fig. 1 Physical and dimensional schematic of CF/PA66 spline

1.4 测试与表征

(1)自然老化实验。自然老化实验地点为中国

上海市(东经 $120^{\circ}51'$ 至 $122^{\circ}12'$, 北纬 $30^{\circ}40'$ 至 $31^{\circ}53'$ 之间)。将CF/PA66试样敞口放置于收纳盒内,敞

口静置于室内36个月。上海市12个月份的气候数据见表1^[23]。

表1 上海12个月份平均气候数据汇总

Tab. 1 Summary of 12 months mean climate data in Shanghai

Climate indicator	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Average high temperature/ $^{\circ}\text{C}$	8.1	10.1	13.8	19.5	24.8	27.8	32.2	31.5	27.9	22.9	17.3	11.1
Average low temperature/ $^{\circ}\text{C}$	2.1	3.7	6.9	11.9	17.3	21.7	25.8	25.8	22.4	16.8	10.6	4.7
Average humidity/%	74	73	73	72	72	79	77	78	75	72	72	71
Average sunshine time/h	10	11	12	12	13	14	14	13	12	11	10	10
Average UV index	4	5	7	9	10	11	11	11	9	7	4	3

(2)拉伸测试。拉伸测试标准为GB/T 1447-2005,加载速度为2 mm/min,测试温度25 $^{\circ}\text{C}$ 。

(3)弯曲测试。弯曲测试标准为GB/T1449-2005,加载模式为三点弯曲,加载速度为2 mm/min,跨厚比16:1,测试温度25 $^{\circ}\text{C}$ 。

(4) SEM分析。将断裂样品的断口镀金制样后,常温下放入SEM中,观察断口处的碳纤维和树脂基体形态面貌。

2 结果与讨论

2.1 CF/PA66未老化前的力学性能分析

CF/PA66未老化前的拉伸性能和弯曲性能见表2,由表2可知,CF/PA66复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度、弯曲模量的离散系数(CV)分别为2.34%,1.43%,2.04%,1.79%,均不超过3%。由此可见,样品制备工艺稳定,样品力学性能一致性较好,能够较好地代表CF/PA66未老化时的力学性能。

表2 CF/PA66未老化时的力学性能汇总

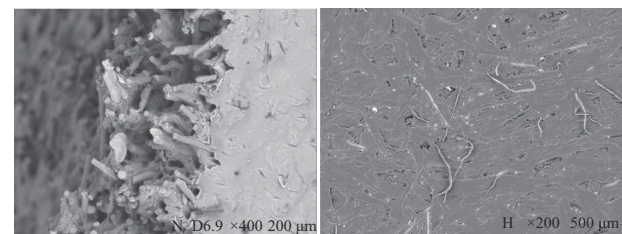
Tab. 2 Summary of mechanical properties of CF/PA66 before aging

Mechanics index	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa	Flexural strength/MPa	Flexural modulus/GPa
Average value	156.87	20.40	214.39	12.67
CV/%	2.34	1.43	2.04	1.79

2.2 自然老化对CF/PA66的外观影响

图2为自然老化前后CF/PA66试样表面形貌对比图。图2a为未老化前的试样表面,图2b为自然老化后的试样表面。由图2可以看出,老化前的试样表面树脂基体较为光滑。而老化36个月后的试样表面粗糙得多,表面存在大量裂缝、凹坑和孔洞等表面缺陷,碳纤维暴露出来,且树脂基体表面存在粉末状小颗粒。

CF/PA66复合材料在水分、热、氧、紫外线等外界老化因素的综合作用下,树脂基体中的大分子链发生断裂,逐渐降解。随着大分子的不断降解,树

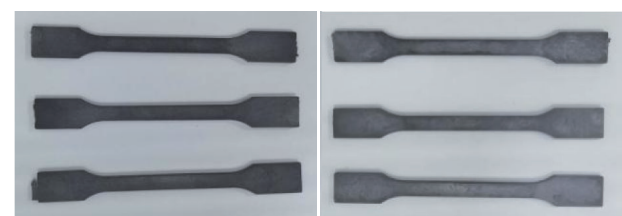


(a) Before aging (b) After aging

图2 CF/PA66自然老化前后表面微观对比图

Fig. 2 Microscopic comparison of surface of CF/PA66 before and after natural aging

脂基体表面变得粗糙,形成大量的裂缝、凹坑和孔洞。当包裹碳纤维的树脂基体降解后,碳纤维暴露在试样表面。而试样表面的粉状小颗粒可能由PA66降解后形成的有缺陷的结晶构成,这些有缺陷的结晶本质是降解后的低相对分子质量物质^[24]。因此,CF/PA66经过36个月的自然老化后,其表面出现粉化现象,具体宏观表现为外观发白,试样表面有白色粉末状物质(如图3所示)。



(a) Before aging (b) After aging

图3 CF/PA66自然老化前后表面宏观对比

Fig. 3 Macro-level comparison of surface morphology before and after natural aging of CF/PA66

2.3 自然老化前后力学性能对比分析

CF/PA66自然老化36个月后的拉伸力学性能见表3。由表3可知,老化后的CF/PA66复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度、弯曲模量的离散系数CV分别为2.79%,2.93%,2.10%,1.03%,能够较好地代表CF/PA66经36个月自然老化后的力学性能。CF/PA66自然老化36个月后的拉伸强度、

表3 CF/PA66自然老化后力学性能汇总

Tab. 3 Summary of mechanical properties of CF/PA66 after natural aging

Mechanics index	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa	Flexural strength/MPa	Flexural modulus/GPa
Average value	121.21	17.46	197.64	11.53
CV/%	2.79	2.93	2.10	1.03

拉伸弹性模量、弯曲强度、弯曲模量保留率见表4。由表4可知,经过36个月的自然老化,CF/PA66复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度、弯曲模量的保留率分别为77.27%, 85.59%, 92.18%, 91.03%。CF/PA66的弯曲强度、弯曲模量的保留率均明显高于拉伸强度、拉伸弹性模量的保留率。

表4 CF/PA66自然老化后力学性能保留率汇总

Tab. 4 Summary of mechanical properties retention rate of CF/PA66 after natural aging

Mechanics index	Tensile strength	Tensile modulus	Flexural strength	Flexural modulus
Retention rate/%	77.27	85.59	92.18	91.03

2.4 拉伸破坏分析

CF/PA66自然老化前后的拉伸应力-应变曲线如图4所示。由图4可以看出,对于未老化的CF/PA66,其应力随着应变的增加而增加,第一阶段时拉伸应力与应变呈现线性关系;第二阶段时应力随着应变的增加而缓慢增加,但仍属于弹性阶段。当应力达到最大时,试样瞬间断裂,应力骤降为0,表现出明显的脆性断裂行为。对于自然老化后的CF/PA66,随着应变的增加,第一阶段时拉伸应力与应变呈现线性关系;第二阶段时应力随着应变的增加缓慢增加,属于弹性阶段;第三阶段,随着拉伸的继续,CF/PA66发生明显屈服。当应变达到最大时,试样断裂。通过对比CF/PA66自然老化前后的应力-

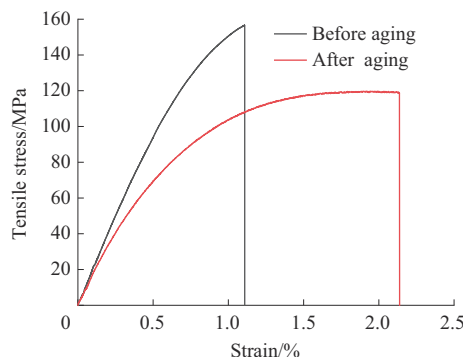
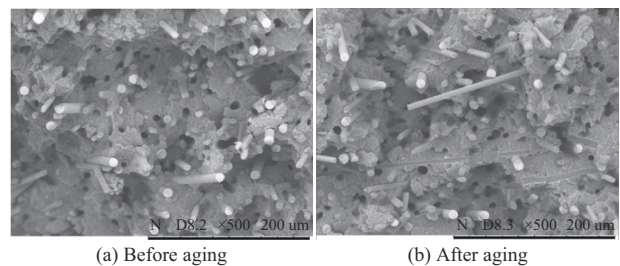


图4 CF/PA66自然老化前后拉伸应力-应变曲线对比

Fig. 4 Comparison of tensile stress-strain curves before and after natural aging of CF/PA66

应变曲线可以看出,老化前的曲线的在弹性阶段斜率一直大于老化后的曲线的斜率,这也说明CF/PA66老化前的拉伸弹性模量高于老化后的拉伸弹性模量,这与测试数据相符合。此外,通过对比还可以发现,CF/PA66老化后的断裂伸长率大于老化前的断裂伸长率。

CF/PA66自然老化前后的拉伸失效模式均为样条断裂,断口的SEM照片如图5所示。由图5可以看出,自然老化前后,CF/PA66的断口形貌无明显差别。在断口处可以观察到裸露在树脂基体外的碳纤维以及树脂基体上存在着圆形孔洞。裸露在外的碳纤维分两种:一种是纤维端部光滑、无破坏痕迹的碳纤维(如图6所示),这类碳纤维与树脂基体间的界面结合力较弱,在拉伸应力的作用下,碳纤维受拉从树脂基体中抽拔出来,并在树脂基体上留下孔洞,但纤维本身未发生破坏;第二种是端部发生破坏的碳纤维(如图7所示),这类碳纤维与树脂基体间的界面结合力较强,受拉时碳纤维发生断裂,而



(a) Before aging

(b) After aging

图5 CF/PA66自然老化前后拉伸断口形貌对比

Fig. 5 Comparison of tensile fracture morphology of CF/PA66 before and after natural aging

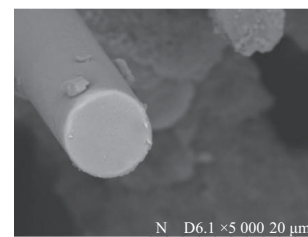


图6 从树脂基体中抽拔的碳纤维形貌

Fig. 6 Morphology of carbon fiber extracted from resin matrix

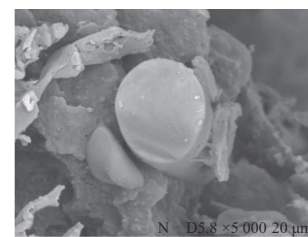


图7 拉伸断裂后的碳纤维形貌

Fig. 7 Morphology of carbon fiber after tensile fracture

后从树脂基体中抽拔出来。因此,CF/PA66自然老化前后的拉伸失效模式均为断裂。失效破坏机理为拉伸应力下树脂基体的断裂、碳纤维的断裂和碳纤维的抽拔。

在自然老化过程中,CF/PA66拉伸弹性模量、拉伸强度降低的原因如下:(1)在光、热、水、氧气等外部因素的作用下,CF/PA66中的树脂基体会发生降解反应,大分子链断裂分解,导致树脂基体本身的拉伸力学性能下降;(2)水分子的渗入会破坏树脂基体与纤维间的黏接性能,降低界面强度,而PA66树脂具有较高的吸湿性,吸收的水分渗透到碳纤维与树脂基体间的界面处,导致PA66树脂基体与碳纤维之间的界面性能变差,界面强度降低。因此,自然老化后的CF/PA66拉伸弹性模量、拉伸强度均下降。

自然老化后,CF/PA66断裂伸长率增加的原因是CF/PA66中的碳纤维为短纤维,非连续地分布于PA66树脂基体中,对于未老化的CF/PA66,碳纤维与树脂间的界面结合性能好,应力传递效率高,可以有效地将作用在树脂基体上的应力传递到碳纤维上。由拉伸应力-应变曲线可以看出,当CF/PA66发生破坏时,树脂基体的形变处于可恢复的弹性阶段。当应力达到最大时,CF/PA66发生的破坏,无论是碳纤维的断裂,还是碳纤维的抽拔,都会降低碳纤维的增强效果,从而使树脂基体承受更大应力。此时CF/PA66所受到的拉伸应力远大于PA66树脂基体可承受的最大极限。此时,PA66树脂基体中的大分子链来不及响应,树脂基体瞬间断裂。因此,CF/PA66在到达最大拉伸应力时,应力骤降为0。

材料拉伸弹性模量的大小反映了材料的抗形变能力。拉伸弹性模量越大,材料越不容易在拉伸应力作用下发生形变,反之亦然。在水分子的作用下,界面性能变差,拉伸应力通过界面从树脂基体传递到碳纤维上的效率变低。在相同的拉伸应力水平下,与老化前相比,老化后的CF/PA66中的树脂基体承受更多的应力。树脂基体在外界光、热、水分等的降解作用下,大分子链断裂,拉伸弹性模量下降,抵抗变形能力降低。在这两种因素的综合作用下,老化后的CF/PA66的断裂伸长率大于老化前。

通过拉伸应力-应变曲线可以推测出:对于老化后的CF/PA66,在其拉伸应力达到最大值前,树脂基体已经发生了不可恢复的塑性形变。当应力达到最大值时,老化后的CF/PA66中的树脂基体同样会

在碳纤维增强效果降低的瞬间承受超出其极限的拉伸应力。此时,PA66树脂基体中的大分子链来不及响应,导致树脂基体瞬间断裂,CF/PA66的应力瞬间归零。图8为自然老化前后树脂基体放大图。由图8可以看出,与老化前相比,自然老化后的树脂基体断面处发生了明显的塑性形变。这验证了上述猜测。

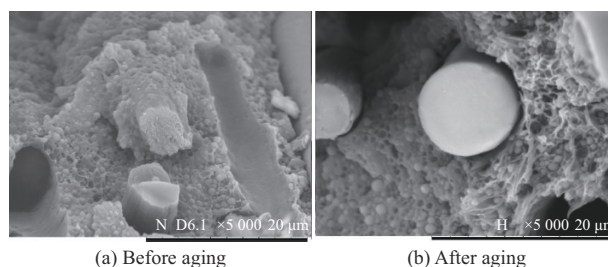


图8 自然老化前后树脂基体放大图

Fig. 8 Enlarged view of resin matrix before and after natural aging

拉伸破坏过程中,树脂基体的断裂、碳纤维的断裂与抽拔都会吸收能量。CF/PA66的自然老化前后的拉伸载荷-位移曲线如图9所示。复合材料在拉伸破坏过程中吸收的能量的计算公式见式(1)。

$$U = \int_0^S P \cdot dS \quad (1)$$

式中: U 为吸收的能量; P 为载荷; S 为位移。

由公式(1)可知,吸收的能量在数值上等于载荷-位移曲线下方的面积值。由图9可以明显看出,自然老化后的拉伸载荷-位移曲线下方面积大于老化前的拉伸载荷-位移曲线下方的面积。这说明拉伸破坏过程中,自然老化后的CF/PA66吸收的能量比未老化的CF/PA66多。导致这种现象的原因是老化后的树脂基体在拉伸过程中发生了更大的塑性形变,导致老化后的CF/PA66在拉伸过程中吸收了更多的能量。拉伸破坏过程中吸收的能量更多,拉

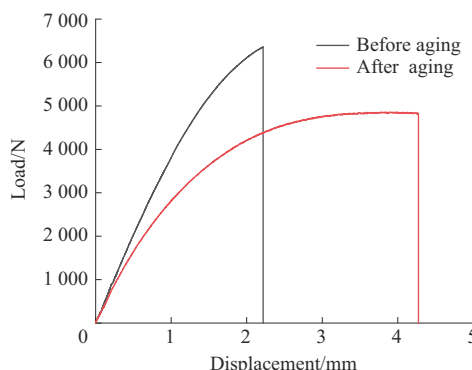


图9 CF/PA66自然老化前后拉伸载荷-位移曲线对比

Fig. 9 Comparison of tensile load-displacement curves before and after natural aging of CF/PA66

伸断裂伸长率更大,这些都说明自然老化提高了CF/PA66的拉伸韧性。

2.5 弯曲破坏分析

CF/PA66自然老化前后的弯曲应力-应变曲线如图10所示。CF/PA66自然老化前后的弯曲应力-应变曲线的初始阶段,弯曲应力随应变的增长呈现线性增长;第二阶段弯曲应力与应变不再呈现线性关系,但弯曲应力仍随着应变的增加而增加。当应力达到最大时,应力值都瞬间下降,这说明自然老化前后的CF/PA66在弯曲载荷作用下都发生了脆性破坏。此外,还可以看出,自然老化后,CF/PA66弯曲失效时的应变大于未老化时的弯曲失效时的应变。

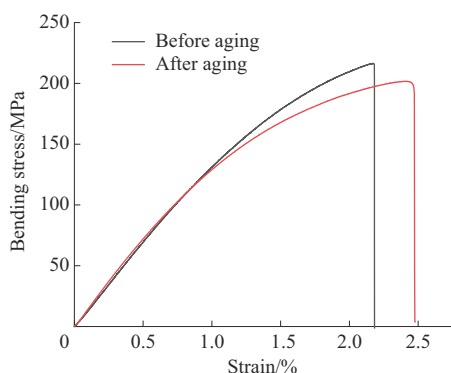


图10 CF/PA66自然老化前后弯曲应力-应变曲线对比

Fig. 10 Comparison of bending stress-strain curves of CF/PA66 before and after natural aging

在进行三点弯曲实验时,在三点弯曲荷载下试样的主应力状态可以从宏观上分为两部分:接近压力点的上部区域受压缩载荷;远离压力点的下部区域受拉伸载荷,且受拉伸区域面积远大于受压缩区域面积^[19,25]。对于CF/PA66,其自然老化前的弯曲失效模式为样条断裂(如图11所示),而自然老化后的弯曲失效模式为样条受拉伸区域出现裂纹而非样条断裂(如图12所示)。



图11 未老化的CF/PA66弯曲失效模式

Fig. 11 Bending failure mode of CF/PA66 without aging

结合2.4可知,弯曲破坏中,CF/PA66的拉伸区会发生树脂基体的断裂、碳纤维的断裂与抽拔,同时压缩区受压^[9],这些过程中CF/PA66都会吸收能量。由公式(1)可知,弯曲过程中CF/PA66吸收的能量数值上等于载荷-挠度曲线上弯曲载荷曲线下的面积值。CF/PA66自然老化前后的弯曲载荷-

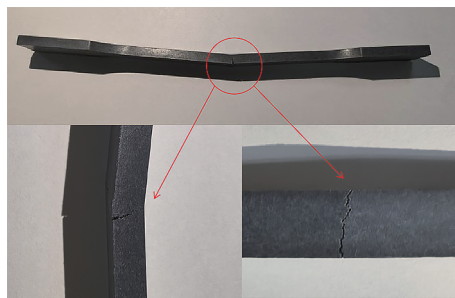


图12 自然老化后的CF/PA66弯曲失效模式

Fig. 12 Bending failure mode of CF/PA66 after natural aging

挠度曲线如图13所示。由图13可以明显看出,自然老化后的弯曲载荷曲线下方面积大于老化前的弯曲载荷曲线下方面积。这说明弯曲破坏过程中,自然老化后的CF/PA66吸收的能量比未老化的CF/PA66多。

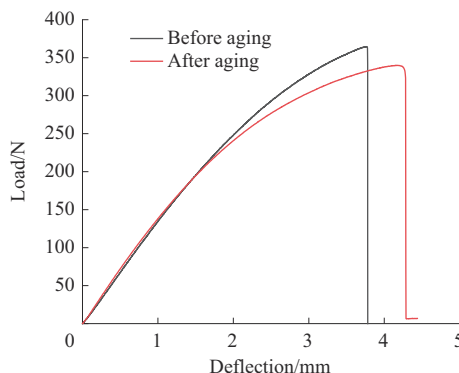


图13 CF/PA66自然老化前后弯曲载荷-挠度曲线对比

Fig. 13 Comparison of bending load-deflection curves of CF/PA66 before and after natural aging

对于自然老化后的CF/PA66,受拉伸区域出现裂纹,弯曲破坏过程中吸收的能量更多,破坏失效时的应变更大,这些都是说明了自然老化提高了CF/PA66的弯曲韧性。

最后从自然老化后CF/PA66的裂纹首先出现在拉伸区域可以推断出以下结论:对于CF/PA66,其受到弯曲破坏时,裂纹首先在拉伸区域出现,随后裂纹会快速扩展。对于自然老化后的CF/PA66,其韧性提高,导致裂纹扩展到一定程度后停止扩展,其最终的失效模式为样条的受拉伸区域出现裂纹,而非样条断裂。而对于未老化的CF/PA66,裂纹扩展到整个截面,最终导致样条断裂失效。

3 结论

通过注塑成型法制备了CF/PA66拉伸样条,并将其放置在室内进行为期36个月的自然老化实验。通过对比自然老化前后的表观、力学性能、破坏模

式,得到以下结论。

(1)经过36个月的自然老化,CF/PA66发生降解生成低相对分子质量物质,表面发生粉化现象。

(2)经过36个月的自然老化,CF/PA66的拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度、弯曲模量的保留率分别为77.27%,85.59%,92.18%,91.03%。

(3)自然老化未改变CF/PA66的拉伸失效模式及破坏机理。

(4)为期36个月的自然老化提高了CF/PA66的弯曲韧性。

参考文献

- [1] YANG Zhiyong, ZHANG Dong, GU Chunhui, et al. Research and application of advanced resin matrix composites for aerospace shuttle vehicles abroad[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(7):3 029–3 043.
- [2] ZHANG J, LIN G, VAIDYA U, et al. Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 250. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.110463.
- [3] 刘勇,李倩楠,李国超,等.纤维增强树脂基复合材料在船舶领域的应用综述[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 38(1): 27–35.
- LIU Yong, LI Qiannan, LI Guochao, et al. Application of fiber reinforced resin matrix composites in vessels: A review[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2024, 38(1):27–35.
- [4] 姜立业,李娜,陈鹏,等.碳纤维复合材料在轻量化的应用和前景[J]. *塑料工业*, 2022, 50(1):14–19.
- JING Liye, LI Na, CHEN Peng, et al. Application and prospect of carbon fiber composite in lightweight[J]. *China Plastics Industry*, 2022, 50(1):14–19.
- [5] 吴琨.热塑性树脂基复合材料在航空领域的研究进展[J]. *价值工程*, 2020, 39(9):210–211.
- WU Kun. Research progress of thermoplastic resin matrix composites in the field of aviation[J]. *Value Engineering*, 2020, 39(9): 210–211.
- [6] 党婧,王凯,肇研.碳纤维增强热塑性树脂基复合材料界面性能研究[J]. *化工新型材料*, 2024, 52(4):142–145.
- DANG Jing, WANG Kai, ZHAO Yan. Study on interfacial properties of carbon fiber reinforced thermoplastic resin composites[J]. *New Chemical Materials*, 2024, 52(4):142–145.
- [7] 肇研,刘寒松.连续纤维增强高性能热塑性树脂基复合材料的制备与应用[J]. *材料工程*, 2020, 48(8):49–61.
- ZHAO Yan, LIU Hansong. Preparation and application of continuous fiber reinforced high-performance thermoplastic composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(8):49–61.
- [8] 韩顺涛,周翔,李如意,等.聚酰胺6/纤维复合材料的进展[J]. *塑料*, 2023, 52(5):118–122.
- HAN Shuntao, ZHOU Xiang, LI Ruyi, et al. Progress of polyamide 6/fiber composite[J]. *Plastics*, 2023, 52(5):118–122.
- [9] 夏礼栋,张琦,高达利,等.聚酰胺/碳纤维复合材料中纤维表面改性研究进展[J]. *合成树脂及塑料*, 2022, 39(1):73–78.
- XIA Lidong, ZHANG Qi, GAO Dali, et al. Preparation of polyamide 6 microfiber reinforced polypropylene composite and its property of chemical foam injection molding[J]. *China Synthetic Resin and Plastics*, 2022, 39(1):73–78.
- [10] 叶晓东,黄伟,贾凤,等.聚酰胺6合成、改性技术及应用研究进展[J]. *现代化工*, 2022, 42(10):71–75.
- YE Xiaodong, HUANG Wei, JIA Feng, et al. Research progress on synthesis, modification technology and application of polyamide 6[J]. *Modern Chemical Industry*, 2022, 42(10):71–75.
- [11] VAHABI H, SONNIER R, FERRY L. Effects of ageing on the fire behaviour of flame-retarded polymers: A review[J]. *Polymer International*, 2015, 64(3):313–328.
- [12] 张代军,唐邦铭,包建文,等.海南地区T700/5288碳纤维复合材料自然老化性能研究[J]. *材料工程*, 2012(11):31–33, 56.
- ZHANG Daijun, TANG Bangming, BAO Jianwen, et al. Study of environmental aging of T700/5288 CFRP in Hainan[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2012(11):31–33, 56.
- [13] 张海燕,李根臣,王义师,等.碳纤维复合材料结构件自然老化试验研究[J]. *化工新型材料*, 2018, 46(4):63–65.
- ZHANG Haiyan, LI Genchen, WANG Yishi, et al. Study on environmental aging of CFRP structure[J]. *New Chemical Materials*, 2018, 46(4):63–65.
- [14] 张伟,李旭武,张适龄,等.长玻纤增强尼龙6复合材料油老化寿命的评价[J]. *塑料工业*, 2014, 42(10):44–46, 54.
- ZHANG Wei, LI Xuwu, ZHANG Shiling, et al. The aging life evaluation in oil for long glass fiber reinforced nylon 6 composite[J]. *China Plastics Industry*, 2014, 42(10):44–46, 54.
- [15] 殷宗莲,杨万均,肖敏,等.高低温条件下碳纤维增强尼龙复合材料的老化特征分析[J]. *装备环境工程*, 2015, 12(3):106–110.
- YIN Zonglian, YANG Wanjuan, XIAO Min, et al. Aging characteristics analyses of carbon fiber reinforced nylon composites in high and low temperature conditions[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2015, 12(3):106–110.
- [16] 宋海硕,周登凤,张道海,等.短玻纤增强尼龙10T复合材料的热氧老化性能[J]. *材料工程*, 2017, 45(12):43–49.
- SONG Haishuo, ZHOU Dengfeng, ZHANG Daohai, et al.

- Thermal-oxidative aging properties of short glass fiber reinforced nylon 10t composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2017, 45(12):43–49.
- [17] 王焯. 碳纤维增强尼龙-6 复合材料湿热老化研究[D]. 大连:大连理工大学, 2018.
- WANG Chuo. Hygrothermal aging study of carbon fibre reinforced polyamide 6 composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [18] 王莹莹. CF/PA6 复合材料层合板改性与湿热老化机理研究[D]. 大连:大连理工大学, 2019.
- WANG Yingying. Hygrothermal aging study of carbon fibre reinforced polyamide 6 composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [19] 侯宗姊. 玻璃纤维增强热塑性树脂基复合材料的耐久性研究[D]. 上海:东华大学, 2019.
- HOU Zongzi. A study on the durability of glass fiber reinforced thermoplastic composite[D]. Shanghai: Donghua University, 2019.
- [20] 雷永鹏. 连续碳纤维/尼龙 6 复合材料吸湿行为与老化性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2022.
- LEI Yongpeng. Research on hygroscopic behavior and mechanical aging of continuous carbon fiber/nylon6 composites[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.
- [21] 黄书峰. 湿热环境下 CF/PA6 复合材料力学性能退化及损伤破坏行为研究[D]. 太原:太原理工大学, 2022.
- HUANG Shufeng. Damage and failure behavior of CF/PA6 composite under hygrothermal environment[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [22] 余冰, 任天翔, 缪宏超, 等. 单向 CF/PA6 复合材料性能劣化及老化寿命预测[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(1):116–122.
- YU Bing, REN Tianxiang, MIAO Hongchao, et al. Property degradation and life prediction of unidirectional CF/PA6 composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(1):116–122.
- [23] 气候和每月天气预报. 上海市, 中国[EB/OL]. [2024-08-16]. Weather Atlas. <https://www.weather-atlas.com/zh/china/shanghai-climate>.
- [24] 左晓玲, 邵会菊, 吴斌, 等. 热氧老化对阻燃型长玻纤增强尼龙 6 静动态力学及降解动力学的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2014, 30(6):54–59.
- ZUO Xiaoling, SHAO Huiju, WU Bin, et al. Effects of thermal-oxidative aging on the static and dynamic mechanical properties and thermal degradation kinetic of flame retardant long-glass-fiber reinforced nylon 6 composites[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2014, 30(6):54–59.
- [25] WANG Xianchen, HOU Zongzi, YANG Yuqiu. A study on the aging resistance of injection-molded glass fiber thermoplastic composites[J]. 2022, 23:502–514.