

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.01.018

单向CF/PA6复合材料性能劣化及老化寿命预测

余冰¹,任天翔^{1,2,3,4},缪宏超^{1,2,3,4},陈立峰⁵,沈伟⁵,王伟⁶,赵德方^{1,2,3,4,7,8},占海华^{1,2,3,4}

(1.绍兴文理学院纺织服装学院,浙江绍兴 312000; 2.浙江省清洁染整重点实验室,浙江绍兴 312000;
3.国家碳纤维工程技术研究中心浙江分中心,浙江绍兴 312000; 4.纤维基复合材料国家工程研究中心绍兴分中心,浙江绍兴 312000;
5.绍兴宝旌复合材料有限公司,浙江绍兴 312000; 6.德州学院纺织服装学院,山东德州 253000;
7.浙江大学材料科学与工程学院,杭州 310058; 8.海亮集团有限公司,杭州 310000)

摘要:利用热压成型工艺制备出碳纤维(CF)/尼龙6(PA6)复合材料单向板,并将复合材料试样置于蒸馏水热水浴中,分别在25,60,80℃下进行不同时间的湿热老化,再对湿热老化后复合材料试样进行吸湿测试、三点弯曲测试、微观形貌表征,探究复合材料的吸湿规律、力学性能劣化规律和微观形貌变化,并对复合材料的长期寿命进行预测。结果发现,复合材料在25,60℃下的吸湿行为基本符合Fick扩散定律,而80℃下在老化最后阶段出现了背离Fick扩散定律现象。复合材料的弯曲强度随老化温度、老化时间的增加呈下降趋势,分别在25,60,80℃下老化120 d后,试样弯曲强度分别下降了22.78%,25.0%,26.25%。但是老化温度、老化时间对弯曲弹性模量无显著影响,且CF与PA6树脂之间的界面黏合性能随着温度、时间的增加逐渐变差。以绍兴2021年平均温度作为服役温度,基于加速老化测试模型和阿伦尼乌斯理论建立了CF/PA6复合材料在服役环境下剩余弯曲强度的预测模型,可预测到1400 d后,CF/PA6复合材料的弯曲强度保留率在64.8%左右。

关键词:CF/PA6复合材料;吸湿行为;弯曲性能;微观形貌;寿命预测

中图分类号: TQ342+.61 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)01-0116-07

Property degradation and life prediction of unidirectional CF/PA6 composites

YU Bing¹, REN Tianxiang^{1,2,3,4}, MIAO Hongchao^{1,2,3,4}, CHEN Lifeng⁵, SHEN Wei⁵, WANG Wei⁶,ZHAO Defang^{1,2,3,4,7,8}, ZHAN Haihua^{1,2,3,4}

(1. College of Textile and Garment, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 2. Key Laboratory of Clean Dyeing and Finishing Technology of Zhejiang Province, Shaoxing 312000, China; 3. Zhejiang Sub-center of National Carbon Fiber Engineering Technology Research Center, Shaoxing 312000, China; 4. Shaoxing Sub-center of National Engineering Research Center for Fiber-based Composites, Shaoxing 312000, China; 5. Shaoxing Baojing Composite Materials Co., Ltd., Shaoxing 312000, China; 6. College of Textile and Garment, Dezhou University, Dezhou 253000, China; 7. School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 8. Hailiang Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract : Unidirectional CF/PA6 composite plates were fabricated by the hot-compression molding technique, and the composite specimens were immersed in distilled water bath at 25, 60, 80 °C for different hydrothermal aging periods, then moisture absorption test, three-point bending test, microscopic morphology characterization were carried out to investigate the moisture absorption behavior, degradation of mechanical properties, and microscopic morphological changes. Furthermore, the long-term life of composite specimens was predicted. The results show that the moisture absorption behavior of the composites at 25 and 60 °C is basically consistent with Fick's diffusion law, while the deviation from the Fick's diffusion law occurs at the last stage of aging at 80 °C. The flexural strength of composites decreases with the increase of aging temperature and aging time, after 120 days of aging at temperatures of 25, 60, 80 °C, the flexural strength of the samples decreases by 22.78%, 25.0%, 26.25% respectively. However, the aging temperature and aging time have no significant impact on the flexural modulus, and the interfacial bonding strength

基金项目: 浙江省“尖兵”、“领雁”研发攻关计划项目(2023C01097),浙江省教育厅一般科研项目(Y202146403),绍兴市产业关键技术攻关计划项目(2022B41009),绍兴文理学院校级科研计划项目(2020LG1006)

通信作者: 赵德方,副教授,主要从事高性能纤维及其复合材料的开发与应用研究

收稿日期: 2023-11-01

引用格式: 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 PA6/ unidirectional CF composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(1): 116-122.

between carbon fiber and resin gradually deteriorates with the increase of temperature and time. This experiment takes the average temperature in Shaoxing in 2021 as the service temperature. Based on the accelerated aging test model and the Arrhenius theory, a predictive model for the residual bending strength of CF/PA6 composite materials in service environment was established. It can be predicted that after 1 400 days, the bending strength retention rate of CF/PA6 composites will be around 64.8%.

Keywords : CF/PA6 composite ; moisture absorption behavior ; flexural property ; micromorphology ; life prediction

近年来,我国汽车产量与保有量不断增加,由此带来了环境、能源、安全等方面的一系列问题。随着国家环保政策越发严格,积极推进汽车的节能减排是解决当前汽车工业所面临问题的有效途径。结构减重是汽车工业上为减少机动车燃料消耗和温室气体排放而采取的一种有效方法。为了实现这一目标,碳纤维(CF)复合材料引起了人们的关注,正越来越广泛地用于机动车结构部件,例如汽车内饰、底盘、车身面板、保险杠等^[1-2]。热塑性树脂基复合材料因具有制造周期短、成型速度快、加工成本低、废料易于回收再利用等优点^[3],引起了研究者的广泛关注,并得到了迅速发展。复合材料长时间服役于户外环境中,不可避免地受到紫外线、湿度、温度、空气、复杂外界载荷等因素的影响。其中,湿热环境对复合材料性能的影响尤为显著,会造成其发生物理、化学变化,性能退化直至损坏失效,影响其使用寿命^[4-5]。

一些国内外的研究者对CF增强树脂基复合材料的湿热老化行为进行了研究。老化主要影响聚合物树脂和CF/树脂界面,CF通常被认为是惰性的^[6]。由于聚合物树脂的有机性质,长期浸泡在水中会导致复合材料发生物理和化学变化,导致力学性能劣化。增塑和溶胀是聚合物树脂的主要物理性降解,当吸收的水分被消除且没有发生化学反应时可以在吸湿的初始阶段恢复,可导致聚合物更具延展性,使其玻璃化转变温度降低^[7-8]。特别是在湿热环境下,吸湿还会导致一些不可逆的化学变化产生如基体开裂,CF/树脂界面脱黏^[9]。通过一些力学、热性能测试和表征手段[扫描电子显微镜(SEM)观察、红外光谱分析等],许多研究成果对吸湿扩散对CF增强树脂基复合材料的性能例如拉伸^[10]、层间剪切^[11]、压缩^[12]、弯曲^[13]、疲劳性能^[14]、热性能^[15]的影响进行了报道。然而上述成果主要集中于CF增强热固性复合材料在湿热环境下老化行为,而对于CF增强热塑性复合材料湿热老化研究有限。在复合材料长期寿命预测方面,研究成果主要集中于玻璃纤维复合材料管件和杆件的寿命预测研究^[16-17],而

对于复合材料层合板的寿命预测缺少相关的研究。因此,亟须对其开展相关基础研究工作。CF/尼龙6(PA6)复合材料可应用在新能源汽车的车门和电池盒等汽车零部件,湿热环境的变化可造成复合材料的力学性能退化,因此需要探究复合材料在湿热环境的性能劣化规律以及在湿热环境下的使用寿命情况。确定了湿热环境对CF/PA6复合材料的影响,复合材料才可以得到更合理的使用,发挥出复合材料本身的优势。单向复合材料作为一种常见复合材料形式,在承力结构件中具有显著优势。

笔者以CF/PA6复合材料单向板为研究对象,研究湿热环境下复合材料的吸湿行为、力学性能劣化规律、湿热老化机理以及对其进行长期寿命预测。以绍兴2021年平均温度作为服役温度,采用加速老化测试模型和Arrhenius理论对复合材料的长期寿命和剩余力学性能进行预测。研究成果将深化CF增强热塑性复合材料湿热老化基础研究,为CF增强热塑性复合材料可靠性设计奠定基础,也为复合材料的安全评估提供依据。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

实验原材料为单向CF/PA6预浸料(日本丸八株式会社),CF和PA6的性能见表1。

表1 原材料的性能

Tab. 1 The properties of raw materials

Material	Manufacturer	Type	Elastic modulus/ GPa	Tensile strength/ MPa	Elongation/ %	Density/ (g·cm ⁻³)
CF	Toray	T700S C12K	230	4 900	2.1	1.8
PA6	Mitsubishi Gas Chemical Company	MXD -PA	2.4	82*/48 ^s	4.0*/ 136 ^s	1.1

Note: * represents yielding point, ^s represents break point.

1.2 仪器

数显恒温水浴锅:HH-2,上海力辰邦西仪器科技有限公司;

电子万能试验机:Instron 5980,英斯特朗(上海)试验设备贸易有限公司;

SEM:JSM-6360LV,日本电子株式会社。

1.3 复合材料制备

采用20层单向CF/PA6预浸料(单层预浸料厚度=0.1 mm)在280 °C的温度和4 MPa的压力下压制3.5 min后降至室温,脱模即可得到单向CF/PA6复合材料层合板,该复合材料的纤维体积分数(V_f) $\approx$ 50%。参照JIS K7074-1988标准,将CF/PA6层合板切割成100 mm $\times$ 15 mm $\times$ 2 mm的试样用于后续的吸湿、老化测试与表征。

1.4 测试与表征

1.4.1 吸湿与湿热老化测试

将切割后的CF/PA6复合材料试样置于60 °C的烘箱中处理48 h,用电子天平进行称重得到试样的干重 W_0 ,再将试样分别浸泡在25, 60, 80 °C蒸馏水热水浴中。定期取样,将其表面残留的水分擦干,并进行称重得到试样的湿重 W_t 。称重完成后将试样放回热水浴中,吸水率 M_t (%)可以通过下式进行计算:

$$M_t (\%) = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

在典型的老化时间节点(15, 30, 45, 60, 90, 120天)取出老化试样,每次对3个试样进行称重取平均值。

1.4.2 弯曲性能测试

参照标准JIS K7074-1988,将经过湿热老化处理前后的弯曲试样在万能材料试验机进行三点弯曲测试,搭载10 kN力传感器,加载速率为2 mm/min,跨距为80 mm。测试3个试样取其平均值。

1.4.3 复合材料的微观形貌表征

通过SEM对弯曲试样的断口形貌进行观察,分析复合材料试样湿热老化前后表面的微观形貌变化。测试之前对试样进行喷金处理以增加其导电性,采用的加速电压为20 kV。

2 结果与讨论

2.1 吸湿行为

图1为CF/PA6复合材料在三种不同温度下的吸湿曲线。从吸湿曲线可以看出,将试样浸泡在25 °C,在初始阶段复合材料的吸水率随着老化时间的增加呈现线性增加的趋势,在3 031 h后吸湿速率逐渐减缓直至趋于饱和状态,这说明在此条件下复合材料的吸水规律符合Fick扩散定律。且随着温度升高吸湿速率增大,这归因于温度的提升加速了水分子在复合材料内部的扩散速率。80 °C老化条

件下,在前期阶段复合材料的吸湿曲线符合Fick扩散定律,但是在最后阶段出现了背离Fick扩散定律的现象,这是由于将复合材料试样置于热水浴中,复合材料质量变化呈现一个动态变化的过程。一方面树脂会因为老化而降解,导致复合材料的质量下降,另一方面复合材料的吸水会导致质量增加,而树脂降解所减少的质量大于复合材料吸水所增加的质量,造成了吸湿曲线最后阶段呈下降趋势。

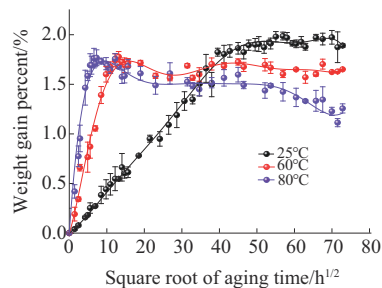


图1 25 °C、60 °C和80 °C下试样的吸湿曲线

Fig. 1 Moisture curves of specimens at 25, 60, 80 °C

2.2 湿热老化对CF/PA6的弯曲性能影响

湿热老化对CF/PA6复合材料弯曲强度的影响如图2所示。从图2可看出试样的干态弯曲强度为1 002.2 MPa,在25 °C的老化条件下,随着老化时间的增加,弯曲强度逐渐下降,在老化60~120天范围内,试样的弯曲强度下降趋势最为明显。在老化时间为120天时,试样的弯曲强度为773.9 MPa,下降了228.3 MPa,下降率达到了22.78%。而在60 °C和80 °C的老化条件下,在老化15天时,试样的弯曲强度就出现了明显的下降,分别为910.6 MPa、896.0 MPa,下降率分别达到了9.14%和10.60%,随着老化时间的延长试样的弯曲强度不断下降。在老化120天后,试样的弯曲强度更是降到了756.7 MPa、739.1 MPa,下降率达到了24.5%和26.25%。再对比不同老化温度对CF/PA6复合材料弯曲强度的影响可以看出,无论是在25, 60 °C还是80 °C条件下老

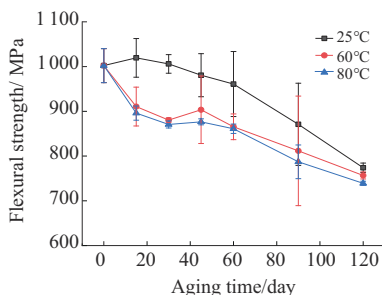


图2 不同湿热老化条件下试样弯曲强度变化

Fig. 2 Variations in flexural strength of specimens exposed to three different hygrothermal conditions

化,试样弯曲强度都是呈下降趋势的,且老化温度为 80 °C 时,试样弯曲强度的下降是最显著的,在老化 120 天后,试样弯曲强度的下降率达到了 26.26%。由此可以得出,CF/PA6 复合材料的弯曲强度随着老化时间的增加而逐渐降低,且老化温度越高则复合材料弯曲强度下降越显著。

湿热老化对 CF/PA6 复合材料弯曲弹性模量的影响如图 3 所示。从图 3 可以看到在 25 °C 的温度下,在整个老化过程中材料的弯曲弹性模量保持相对稳定,从 98.7 GPa 到 105.2 GPa 变化,在 60 °C 下,弯曲弹性模量从 99.9 GPa 到 104.4 GPa 变化。同时,在 80 °C 的高温下,复合材料仍保持相对较高的弯曲弹性模量保留量(即均超过 97%)。从三个不同的老化温度看,在 25 °C 的老化温度时,在老化 120 天时弯曲弹性模量达到了最小值。60 °C 的老化温度下,也是在 120 天时弯曲弹性模量达到了最小值,但在 80 °C 的老化温度下是在老化 90 天时弯曲弹性模量达到最小值。对比以上结果可以得到,不同温度下不同老化时间的 CF/PA6 复合材料的弯曲弹性模量变化较小,下降率均小于 5%,因此老化时间和老化温度对 CF/PA6 复合材料弯曲弹性模量影响不显著。弯曲弹性模量主要由 CF 性能主导,因此受湿度场影响较小^[18]。

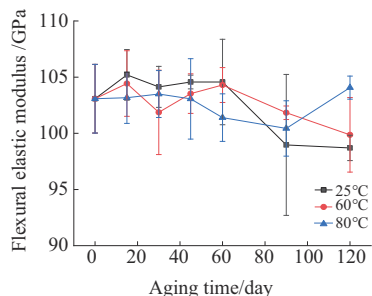


图3 不同湿热老化条件下试样弯曲弹性模量变化

Fig. 3 Variations in flexural elastic modulus of specimens exposed to three different hygrothermal conditions

2.3 湿热老化对 CF/PA6 微观形貌的影响

图 4 为 CF/PA6 复合材料弯曲试样湿热老化前后的弯曲断裂面微观形貌。可以明显看出,干态试样具有粗糙的表面,CF 表面附着了大量的黏附性 PA6 树脂,说明在一定程度上 CF 与 PA6 树脂具有良好的界面结合性能。在 25 °C 环境中浸泡 15 天后,可以观察到较多的 CF 表面覆盖一薄层 PA6 树脂,说明 CF 和树脂的界面黏结性能仍然较好。但在 25 °C 环境中浸泡 90 天和 120 天后,在试样断裂表面可以

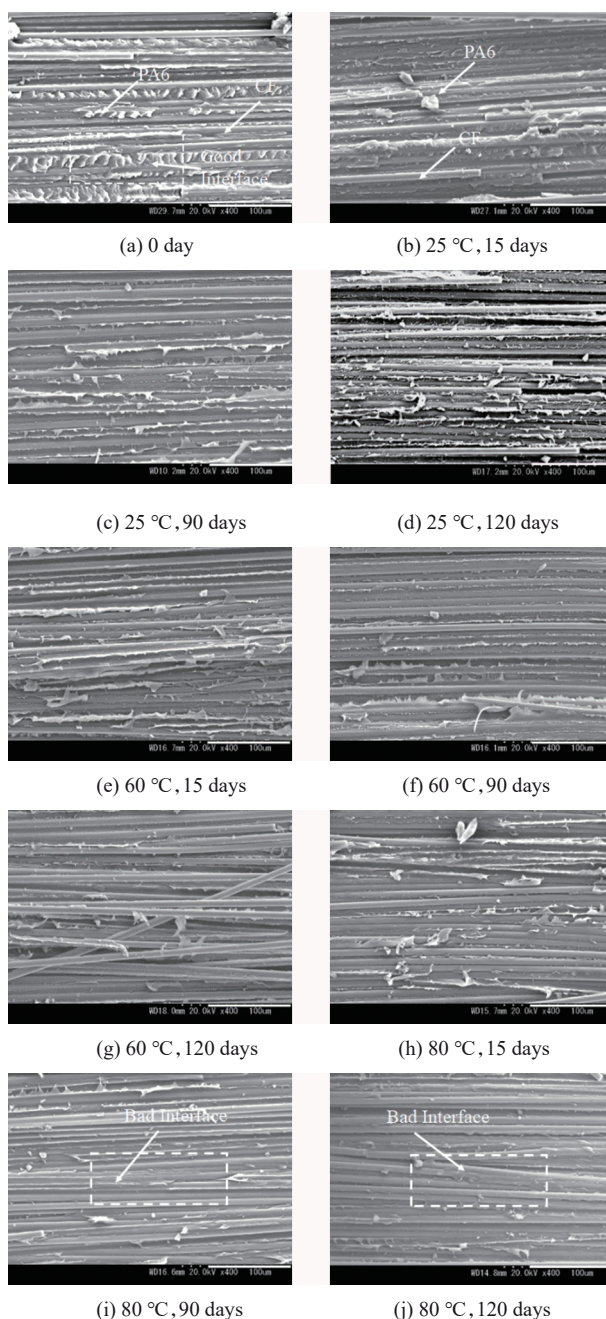


图4 CF/PA6 复合材料弯曲断裂试样在不同温度下、不同老化时间后表面图像

Fig. 4 Flexural fracture surface images of PA/CF laminate specimens for different exposure durations at different temperatures

看到大量的脱黏区域。在 60 °C 环境中浸泡 15 天后,观察到附着在纤维表面的树脂减少,部分区域出现了 CF/树脂界面脱黏现象,随着老化时间的增加,黏附在纤维表面的树脂大幅度减少,界面脱黏行为更加明显。在 80 °C 环境中浸泡 15 天就出现了明显的脱黏行为。这些微观形貌观察结果与不同老化温度和老化时间下的弯曲强度测试结果一致。

一般来说,湿度和温度的综合效应会导致试样的尺寸发生变化,并在复合材料层合板中产生内应力,从而导致CF/树脂界面的恶化^[19]。由吸湿引起的CF/树脂界面的恶化阻碍了树脂有效地将载荷转移到CF上,从而导致复合材料弯曲强度显著下降。

2.4 CF/PA6复合材料的长期寿命预测

通常复合材料在室温、低温湿热环境下的老化周期较长,因此基于短期高温老化试验测试结果来预测复合材料的长期使用寿命是一种十分有效的方法。为评价CF/PA6复合材料在湿热环境中的长期弯曲性能,常采用Arrhenius加速理论^[20-21],根据上述弯曲试验的测试结果对复合材料的长期寿命进行预测。笔者采用的预测模型为:

$$Y = 100 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2)$$

式中:Y为弯曲强度保留率,%;t为湿热老化时间,τ为拟合参数。

该模型考虑的退化机制主要是基于复合材料内部CF/树脂之间的界面脱黏的假设,该破坏机制已经被相关文献所证实^[22]。本试验中CF/PA6复合材料试样的弯曲断裂表面出现了明显的CF/树脂界面脱黏,符合该模型假定。因此,该模型可用于对CF/PA6复合材料的长期寿命进行预测。Arrhenius理论基本假设是,化学降解发生的速率取决于温度,在老化过程中,材料的单一主要退化机制不随时间和温度而变化,而退化速度随温度的升高而加快^[23]。如果已知使用环境中力学性能变化速率,则可以预测材料使用寿命。该模型^[24]可描述为:

$$\nu = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

式中:ν为复合材料的退化速率,1/t;A为与复合材料本身和降解过程中相关常数; E_a 为复合材料活化能,kJ/mol;R为波尔兹曼常数;T为开尔文温度,K。

式(3)可进一步转换为:

$$\frac{1}{\nu} = \frac{1}{A} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

对上式两侧取对数可转换为:

$$\ln\left(\frac{1}{\nu}\right) = \frac{E_a}{R} \frac{1}{T} - \ln A \quad (5)$$

根据式(3)可知,复合材料在不同的老化温度下达到相同力学性能保留率所需的老化时间 t_1 和 t_0 之间存在着一个时间转化因子(T),计算如下:

$$T = \frac{t_0}{t_1} = \frac{\frac{c}{\nu_0}}{\frac{c}{\nu_1}} = \frac{\nu_1}{\nu_0} = \frac{A \exp\left(-\frac{E_a}{RT_1}\right)}{A \exp\left(-\frac{E_a}{RT_0}\right)} = \exp\left[\left(\frac{E_a}{R}\right)\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1}\right)\right] \quad (6)$$

式中:T为时间转化因子, t_1, t_0 是在温度 T_1, T_0 的环境中弯曲强度达到某一特定值时所需要的时间,c为常数; ν_1, ν_0 是在温度 T_1, T_0 下的降解速率。

为评估复合材料在湿热环境中的长期使用寿命,并获得随时间变化的力学性能保持率,有必要设定一个适当的温度,通常年平均使用温度作为考虑对象。设定以2021年绍兴年平均温度(18.7℃)作为实际服役温度,使用公式(2)~(6)对CF/PA6复合材料的长期寿命进行预测。预测过程如下:

首先,通过公式(2)计算出CF/PA6复合材料在25, 60, 80℃环境下的弯曲强度保留率,再对复合材料的弯曲强度保留率-老化时间作图并进行曲线拟合,得到的拟合曲线如图5所示,相应的线性回归系数见表2。

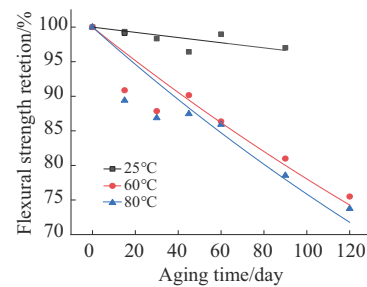


图5 不同老化温度下试样弯曲强度保留率-老化时间拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of flexural strength retention-aging time of specimens at different aging temperatures

表2 CF/PA6复合材料的回归方程(3)的系数

Tab. 2 Coefficients of the regression equations (3) for CF/PA6 composites

Temperature/°C	τ	R ²
25	2 627.7	0.85
60	403.5	0.84
80	361.9	0.82
18.7	3 229.1	0.80

将表2中得到的拟合参数τ值代入公式(2)中,分别计算复合材料在三种不同老化温度环境下达到给定弯曲强度保留率(70%, 75%, 80%, 90%)时所需要的老化时间(t_m)。再通过公式(5)对得到的数据进行线性拟合从而得到Arrhenius曲线,见图6所示,相应的拟合参数见表3。

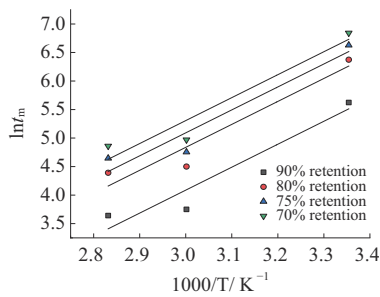


图6 弯曲强度保留率的阿伦尼乌斯曲线

Fig. 6 Arrhenius plots of flexural strength retention

表3 CF/PA6复合材料回归方程(5)的系数

Tab. 3 Coefficients of the regression equations (5) for

Flexural strength retention/%	E_a/R	R^2	CF/PA6 composites		
			25 °C	60 °C	80 °C
70	4 025	0.93	937.2	143.9	129.1
75	4 025	0.93	755.9	116.1	104.1
80	4 025	0.93	586.4	90.0	80.8
90	4 025	0.93	276.9	42.5	38.1

Note: 1) represents time required (i.e., days) to achieve given flexural strength retention.

将表3中求得的 E_a/R 代入公式(6),可以计算出实际服役温度和实验室实际湿热老化温度 T_0 之间的时间转化因子参数,见表4。

表4 CF/PA6复合材料弯曲强度寿命预测的时间转化因子

Tab. 4 Time shift factor for life prediction of flexural strength for

CF/PA6 composites	
Temperature/°C	Time shift factor
25	1.34
60	5.53
80	10.96

将图5中的曲线与对应的时间转化因子参数(见表4)进行叠加转化,可获得CF/PA6复合材料在绍兴年平均温度18.7 °C下的剩余弯曲强度长期寿命预测曲线,如图7所示。可以预测到1 400天后,CF/PA6复合材料弯曲强度保留率在64.8%左右。

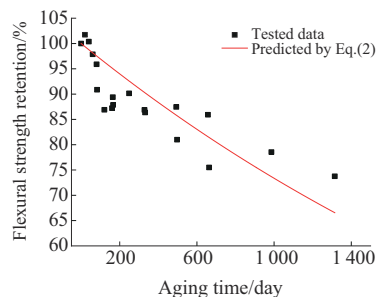


图7 18.7 °C下CF/PA6复合材料的剩余弯曲强度的长期寿命预测

Fig. 7 Long-term life prediction of flexural strength retention of CF/PA6 composites at 18.7 °C

3 结论

(1) CF/PA6复合材料的三个老化温度下的吸水率在初始阶段呈线性增加,之后达到平衡状态。但是在80 °C老化条件下的复合材料吸水率在最后阶段出现了背离了Fick扩散定律的现象。

(2) CF/PA6复合材料的弯曲强度随着老化时间的增加而逐渐下降,且温度越高,弯曲强度下降越明显;而老化时间和老化温度对复合材料的弯曲弹性模量无显著影响。

(3) 在25 °C的老化条件下,老化90天后,CF与树脂的界面结合变得很差;在60 °C和80 °C的老化条件下,随着老化时间的增加,CF与树脂的界面结合变弱,纤维表面附着的树脂变少,出现了CF/树脂界面脱黏的现象,且老化温度越高,界面脱黏现象越明显。

(4) 以绍兴2021年平均温度作为服役温度,采用加速老化测试模型和Arrhenius理论对CF复合材料的长期寿命和剩余力学性能进行预测,可以预测到1 400天后,CF/PA6复合材料的弯曲强度保留率在64.8%左右。此模型和Arrhenius理论也被用来预测其他类型复合材料的长期寿命。

参考文献

- [1] ATTAR P, GALOS J, BEST A S, et al. Compression properties of multifunctional composite structures with embedded lithium-ion polymer batteries[J]. Composite Structures, 2020, 237. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111937.
- [2] HASSAN E A, GE D, ZHU S, et al. Enhancing CF/PEEK composites by CF decoration with polyimide and loosely-packed CNT arrays[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 127. DOI:10.1016/j.compositesa.2019.105613.
- [3] MA Y, YOKOZEKI T, UEDA M, et al. Effect of polyurethane dispersion as surface treatment for carbon fabrics on mechanical properties of carbon/Nylon composites[J]. Composites Science and Technology, 2017, 151:268–281.
- [4] JAFARI A, ASHRAFI H, BAZLI M, et al. Effect of thermal cycles on mechanical response of pultruded glass fiber reinforced polymer profiles of different geometries[J]. Composite Structures, 2019, 223. DOI:10.1016/j.compstruct.2019.110959.
- [5] HOTA G, BARKER W, MANALO A. Degradation mechanism of glass fiber/vinylester-based composite materials under accelerated and natural aging[J]. Construction and Building Materials, 2020, 256. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119462.
- [6] TUAL N, CARRERE N, DAVIES P, et al. Characterization of sea water ageing effects on mechanical properties of carbon/epoxy composites for tidal turbine blades[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 78:380–389.

- [7] YU B, YANG J. Hygrothermal effects in composites[J]. Reference module in Materials Science and Materials Engineering, 2017: 502–519.
- [8] WANG M, XU X, JI J, et al. The hygrothermal aging process and mechanism of the novolac epoxy resin[J]. Composites Part B:Engineering, 2016, 107:1–8.
- [9] AGARWAL A, FOSTER S J, HAMED E. Wet thermo-mechanical behavior of steel-CFRP joints-An experimental study[J]. Composites Part B:Engineering, 2015, 83:284–296.
- [10] HUMEAU C, DAVIES P, JACQUEMIN F. An experimental study of water diffusion in carbon/epoxy composites under static tensile stress[J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2018, 107:94–104.
- [11] WANG Z, XIAN G, ZHAO X L. Effects of hydrothermal aging on carbon fibre/epoxy composites with different interfacial bonding strength[J]. Construction and Building Materials, 2018, 161: 634–648.
- [12] MAROUANI S, CURTIL L, HAMELIN P. Ageing of carbon/epoxy and carbon/vinylester composites used in the reinforcement and/or the repair of civil engineering structures[J]. Composites Part B:Engineering, 2012, 43(4):2 020–2 030.
- [13] BARBOSA A P C, FULCO A P P, GUERRA E S S, et al. Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites[J]. Composites Part B:Engineering, 2017, 110:298–306.
- [14] MENG M, LE H, GROVE S, et al. Moisture effects on the bending fatigue of laminated composites[J]. Composite Structures, 2016, 154:49–60.
- [15] ALESSI S, PITARRESI G, SPADARO G. Effect of hydrothermal ageing on the thermal and delamination fracture behaviour of CFRP composites[J]. Composites Part B:Engineering, 2014, 67: 145–153.
- [16] 李承高, 郭瑞, 王俊琦, 等. CFRP@GFRP 混杂复合材料杆体在水浸泡环境下的性能演化[J]. 复合材料学报, 2021, 38(10): 3 290–3 301.
- LI Chenggao, GUO Rui, WANG Junqi, et al. Performance evolution of CFRP@GFRP hybrid composite rod exposed in the distilled water[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(10): 3 290–3 301.
- [17] 孙博, 李岩. 复合材料湿热老化行为研究及其耐久性预测[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(4):29–35.
- LI Bo, LI Yan. The study on hydrothermal aging behavior of composites and the prediction model of durability[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2013(4):29–35.
- [18] 牛一凡, 李璋琪, 朱晓峰. 全湿热场下碳纤维/环氧树脂复合材料弯曲性能及寿命预测[J]. 复合材料学报, 2020, 37(1):104–112.
- NIU Yifan, LI Zhangqi, ZHU Xiaofeng. Flexural properties and life-time estimation of carbon fiber/epoxy composite under hygrothermal conditions[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37 (1):104–112.
- [19] COSTA M L, ALMEIDA S F M, REZENDE M C. Hygrothermal effects on dynamic mechanical analysis and fracture behavior of polymeric composites[J]. Materials Research, 2005, 8:335–340.
- [20] KARBHARI V M, ABANILLA M A. Design factors, reliability, and durability prediction of wet layup carbon/epoxy used in external strengthening[J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38: 10–23.
- [21] CARRA G, CARVELLI V. Long-term bending performance and service life prediction of pultruded glass fiber reinforced polymer composites[J]. Composite Structures, 2015, 127:308–415.
- [22] WU G, DONG Z Q, WANG X, et al. Prediction of long-term performance and durability of BFRP bars under the combined effect of sustained load and corrosive solutions[J]. Composites for Construction, 2015, 19(3). DOI: 10.1061/(ASCE)CC. 1943-5614.0000517.
- [23] BANK L C, GENTRY T R, THOMPSON B P, et al. A model specification for FRP composites for civil engineering structures [J]. Construction and building materials, 2003, 17(6-7):405–437.
- [24] KARBHARI V M, ABANILLA M A. Design factors, reliability, and durability prediction of wet layup carbon/epoxy used in external strengthening[J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38: 10–23.