

基于湿热环境下的碳纤维复合材料力学性能研究及老化寿命预测

卢东滨 刘欢 马英杰 李成建 徐晋伟

(北京玻璃钢复合材料有限公司, 北京 102101)

文 摘 对T700/TDE-86碳纤维复合材料开展人工加速湿热老化试验,通过对比分析复合材料老化前后剖面形貌和物理化学特性,探讨了复合材料的吸湿扩散行为,研究了复合材料力学性能演变规律;并构建剩余强度计算模型,结合环境系数预测了湿热环境下复合材料的寿命。结果表明:复合材料吸湿率随老化时间延长而逐渐增大直至趋于平缓,符合Fick扩散定律;相对于未进行湿热老化的复合材料,经60℃、95%RH湿热环境老化后的复合材料各力学性能均有所下降,其中剪切强度最为严重,老化64 d后其强度下降率高达25%;基于剩余强度与环境系数预估的T700/TDE-86碳纤维复合材料寿命期限约为30年,为树脂基复合材料未来服役可靠性奠定了基础。

关键词 碳纤维复合材料,湿热老化,力学性能,寿命预测

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.03.005

Mechanical Properties Research and Aging Life Prediction of Carbon Fiber Composites Under Hygrothermal Environment

LU Dongbin LIU Huan MA Yingjie LI Chengjian XU Jinwei

(Beijing composite Materials co. Ltd, Beijing 102101)

Abstract T700/TDE-86 carbon fiber reinforced composites were subjected to artificial accelerated hygrothermal aging experiments. By comparing and analyzing the cross-sectional morphology and physical and chemical properties of the composite before and after aging, the moisture absorption and diffusion behavior of the composites were discussed, and the evolution law of the mechanical properties of composites was studied. The residual strength calculation model was constructed, and aging life of the composite in the hygrothermal environment was predicted by combining with the environmental coefficient. The results showed that the moisture absorption rate of the composite gradually increased until it turned flat with prolongation of aging time, which conformed to Fick's diffusion law. Compared with composite without the hygrothermal aging, the mechanical properties of aged composite decreased under 60℃ and 95%RH, among which the shear strength was the most serious, up to 25% after 64 days of aging. The life of T700/TDE-86 carbon fiber reinforced composites estimated based on residual strength and environmental coefficients was about 30 years, laying a foundation for determining the future service reliability of resin-based composites.

Key words Carbon fiber reinforced composite, The hygrothermal aging, Mechanical properties, Life prediction

0 引言

复合材料作为应用最普遍的材料之一,在众多领域中发挥着不可替代的作用。其中,碳纤维增强复合材料因具有高比强度、高比模量、低密度、优异的化学稳定性及良好的可设计性等特点而被广泛应用于海洋工程、航空航天、交通运输和医疗器械等

诸多方面^[1-4]。然而,碳纤维增强复合材料在服役过程中,会不可避免地遇到自然环境的影响,甚至遭受极端天气的侵袭,例如中国南部地区夏季温度高达42℃,且伴有强烈的紫外线;其年度降水量可以达到1 000 mm以上,相对湿度最高时可达100%^[5]。在这种严苛条件下,复合材料会经受外部多环境因素的

收稿日期:2022-11-06

第一作者简介:卢东滨,1989年出生,工程师,主要从事复合材料相关研究。E-mail:13641202516@163.com

耦合作用,加快材料的失效进程。对于复合材料老化而言,湿热环境是最为主要的影响因素^[6-7]。湿度和温度通过不同的交互损伤机制协同作用于复合材料,导致复合材料性能下降。

为此,近年来不少国内外研究人员展开了深入的探讨。孙博等研究了不同温度下玻璃纤维/环氧树脂复合材料经水浴浸泡后的吸湿性能,发现材料吸湿变化在湿热老化初期符合 Fick 扩散定律,老化后期出现偏离 Fick 扩散定律的现象;且其弯曲强度和弯曲模量均有所下降^[8]。GARGANO 等探索了碳纤维/环氧树脂在外加冲击载荷下吸湿效应对其抗破坏性能的影响,结果表明:随老化时间的增加,材料力学性能明显呈现下降的势态^[9]。NADDER 等对碳纤维/环氧树脂复合材料在湿热条件下的老化行为进行了研究,发现温度越高,湿度越大,材料拉伸强度、弯曲强度和弹性模量下降更明显^[10]。ALMEIDA 等通过开展加速老化试验研究复合材料相关力学性能的变化规律,结果表明:在高温高湿环境中,由于水分渗透进入复合材料内部导致纤维/基体界面损伤和基体塑化,造成其剪切强度降低了 30%,剪切模量降低了 38%^[11]。

我国深海战略的实施和发展使得复合材料被广泛应用,但受到海洋环境包括湿热、盐雾等因素的影响^[12]。因此,开展对复合材料模拟海洋环境加速老化行为的研究显得十分重要。目前,关于复合材料在湿热环境下的力学性能研究相对片面,并且针对其失效行为研究和老化寿命预测相关方面探讨较少。本文以 T700/TDE-86 碳纤维增强复合材料在 60 °C,95%RH 的湿热环境下的人工加速老化试验模拟材料在海水中的老化行为,比较综合地探讨了复合材料力学性能演变规律,并通过表征湿热老化前后材料结构、剖面形貌,研究了复合材料湿热环境下的失效机理;基于环境系数,结合剩余强度计算模型预测复合材料真实寿命,为碳纤维增强复合材料在湿热环境中的应用提供了依据。

1 试验

1.1 材料

增强材料选用国产碳纤维(T700,中复神鹰碳纤维股份有限公司);树脂基体选用环氧树脂(TDE-86,天津晶东化学复合材料有限公司);固化剂采用甲基四氢苯酐(嘉兴联兴化工新材料有限公司);促进剂采用 N,N-二甲基苄胺(上海三爱思试剂有限公司)。

1.2 复合材料制备

环氧树脂 TDE-86、甲基四氢苯酐和 N,N-二甲基苄胺按照质量比为 10:15:1 进行均匀混合形成树

脂胶液,随后将 T700 碳纤维浸过树脂胶液并通过环向缠绕方式制备复合材料,经真空膜包裹密封后,利用烘箱固化,其固化制度如表 1 所示。

表 1 固化制度

Tab. 1 Curing process

序号	开始温度 /°C	升温速率 /°C·min ⁻¹	结束温度 /°C	保温时间 /min
1	室温	1	140	120
2	140	1	160	180
3	160	1	200	180

1.3 老化试验方法

在湿热老化试验中,采用湿热老化试验箱进行试验,以 24 h 为一个周期,其中试验温度为 60 °C,相对湿度保持在 95%。

将干燥的 T700/TDE-86 复合材料标准试样放置于湿热老化试验箱中,连续试验 64 d。然后,对其进行定期取样并及时称重以监测材料吸湿状态。吸湿率作为衡量材料吸湿性能的重要参数,可用以下计算公式表示^[13]:

$$\delta_t = (m_t - m_0) / m_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中, δ_t 为 t 时刻复合材料吸湿率, m_t 为 t 时刻复合材料的质量, m_0 为未进行湿热老化试验时复合材料的干态质量。

1.4 材料性能表征

利用红外光谱仪(FT-IR, Thermo electronic Nicolet 380,美国)测试复合材料湿热前后的傅里叶红外光谱,频谱范围 500~4 000 cm⁻¹;利用扫描电子显微镜(SEM, JSM-6360LV,日本)观察复合材料湿热老化前后层间剪切剖面形貌。

本试验主要针对复合材料的拉伸、弯曲、压缩和剪切等力学性能进行表征和研究。所有力学性能测试均按照表 2 所示国标实施。

表 2 力学性能测试标准

Tab. 2 Test standards for mechanical properties

力学性能	测试标准	加载速度/mm·min ⁻¹
拉伸性能	GB/T 3354—2014	2
弯曲性能	GB/T 5258—2008	2
压缩性能	JC/T 773—2008	1
剪切性能	GB/T 3356—2014	1

2 结果与讨论

2.1 结构与形貌

图 1 所示为未湿热老化与经过 16、32 和 64 d 湿热老化 T700/TDE-86 复合材料的红外光谱图。可以

看出, 3450 cm^{-1} 处特征峰对应于端羟基上的 -OH 的伸缩振动, 2960 cm^{-1} 处特征峰对应于亚甲基上的 C-H 的伸缩振动, 1740 cm^{-1} 处特征峰对应于 C=O 的吸收峰, 1450 cm^{-1} 处特征峰对应于苯环的吸收峰^[14]。对比未湿热老化的树脂基体, 经过湿热老化后的树脂基体的红外光谱图中并没有出现其他特征峰, 也无特征峰消失, 只是一些特征峰的面积产生了微小变化, 这也说明加速老化试验周期内并无新物质产生, 树脂基体结构几乎没有改变。

图2所示为T700/TDE-86复合材料湿热老化前后层间剪切破坏后的剖面形貌。从图2(a)(b)中可以看出, 老化前复合材料内部纤维与树脂基体结合紧密, 没有出现明显的孔隙和微裂纹等缺陷; 湿热老化8 d后纤维周围包裹大量树脂且两者粘结状态良好。而老化16~64 d期间内, 复合材料内部的部分树脂开始松动甚至脱落, 纤维周围的树脂开始逐渐减少, 纤维之间结合不再紧密, 且纤维与树脂基体之间开始存在微小的空隙、微裂纹等缺陷; 随着老化

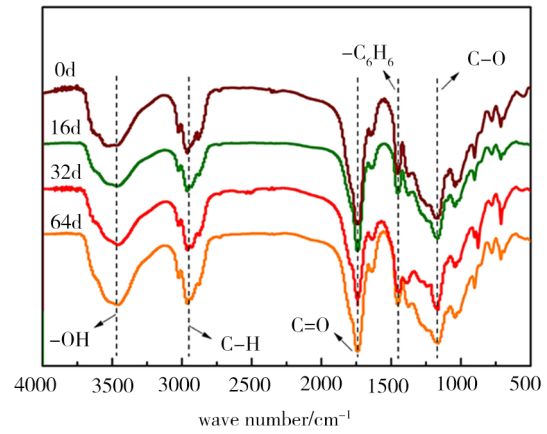


图1 不同老化时间的红外光谱图

时间持续增加, 大量纤维从树脂基体上脱出, 纤维与树脂基体之间出现明显的沟槽, 对复合材料层间产生破坏。这也说明T700/TDE-86复合材料经湿热老化后碳纤维与树脂基体的粘结性能降低, 纤维/基体界面损伤十分严重。

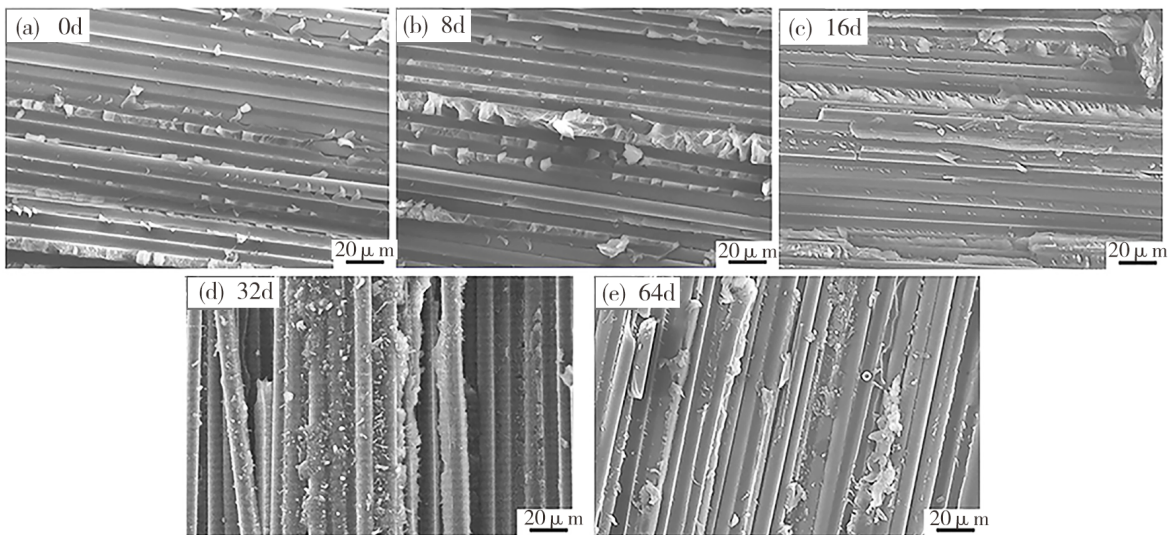


图2 不同老化时间SEM图

Fig. 2 SEM images of composites after different aging times

纤维/基体界面失效机理如下: 在湿热环境中, 碳纤维基本不会吸湿, 绝大部分水分子会进入树脂基体, 促使基体发生溶胀现象, 树脂基体和碳纤维之间必然由于吸湿能力差异发生不匹配膨胀, 造成纤维/基体界面产生湿应力; 同时两者热膨胀能力不同, 湿热老化过程中热膨胀变化也会引起界面应力的产生; 一旦这些应力与界面粘结力失去平衡, 必然导致界面脱粘与开裂^[15-16]。另外, 水分子自由扩散进入基体自身存在的缺陷, 造成应力集中, 基体内部孔隙和微裂纹发生扩张, 导致水分子加速扩散。缺陷处聚集的大量水分子促进树脂基体溶胀, 会使应力进一步扩大, 造成树脂基体内部微裂纹扩展, 甚至纤维/

树脂界面开裂^[17]。

2.2 吸湿行为

对于碳纤维增强复合材料而言, 通常可用Fick扩散定律描述^[18], 具体公式如下:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}) \quad (2)$$

计算可得t时刻吸湿率为:

$$M(t) = 1 - \exp[-7.3(Dt/h^2)^{0.75}] \quad (3)$$

式中, $M(t)$ 为t时刻吸湿率, D 为水分子扩散系数, t 为吸湿时间, h 为复合材料厚度。

图3为T700/TDE-86复合材料吸湿变化曲线和Fick吸湿模型拟合曲线。可以看出, 两者拟合较好, 复合材料吸湿行为符合Fick扩散定律, 且明显地分

为两个阶段。在第一阶段0~16 d内,复合材料的吸湿率与老化时间几乎呈线性关系,吸湿率迅速增加。吸湿初期,经过干燥处理后的复合材料内部必然会被蒸发掉一些水分,当吸湿开始后,一方面由于自由扩散和毛细作用引发大量水分子进入复合材料自由体积空间、孔隙和微裂纹等内部缺陷和纤维/树脂基体界面^[19];另一方面,环氧树脂基体中存在大量的极性亲水分子基团,例如羟基、氨基等,吸引水分子渗透进入基体内部^[20],提高了复合材料吸湿能力,因而此阶段复合材料吸湿率快速增加。

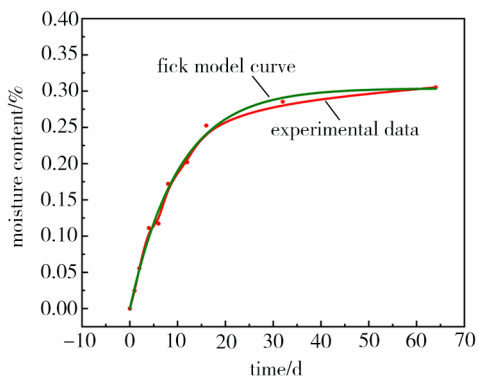


图3 复合材料吸湿变化

Fig. 3 Changes in the moisture absorptiocontent of composite

第二阶段16~64 d,吸湿率增加缓慢,吸湿曲线逐渐趋于平缓。在此阶段,由于水分子持续进入基体、纤维/基体界面以及缺陷,吸湿逐渐达到饱和,复合材料内部水分基本处于平衡状态。经过湿热老化64 d后,材料的吸湿率为0.31%。

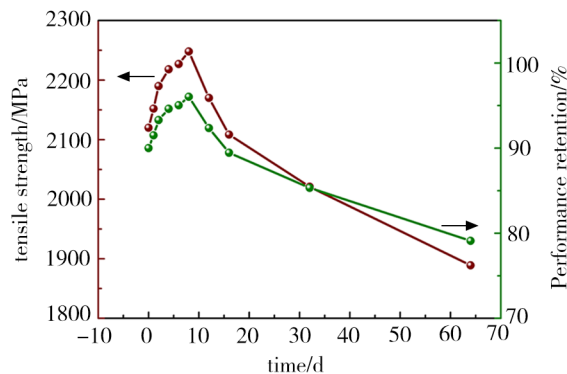
2.3 力学性能表征

力学性能作为衡量复合材料应用能力最重要的指标之一,可以反映复合材料中纤维强度、树脂基体状态以及两者界面性能。

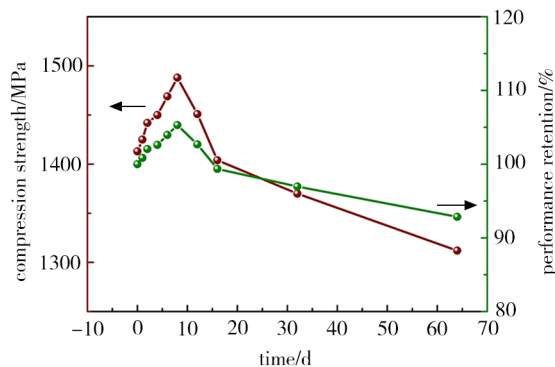
2.3.1 拉伸性能和压缩性能

图4所示为T700/TDE-86复合材料湿热老化64 d的拉伸强度和压缩强度变化规律。可看出,拉伸强度和压缩强度均随着老化时间的延长呈现出先增后减的趋势。在老化0~8 d内,复合材料拉伸强度和压缩强度由初始值2 120和1 413 MPa升至峰值2 248和1 488 MPa。这是因为在老化初期,复合材料处于60 °C下,同时发生基体后固化作用^[21]和水分子溶胀/塑化作用^[22],两种机制相互竞争,前者占据主导地位,从而使复合材料拉伸强度和压缩强度在短时间内得以增强^[23],与复合材料在老化前期所表现的剖面形貌图2(a)(b)相吻合。

此后,复合材料拉伸强度和压缩强度开始快速下降,老化64 d后降至1 889和1 312 MPa,强度保留率分别为89.1%和92.8%。造成这种现象主要是由



(a) 拉伸强度



(b) 压缩强度

图4 湿热老化下复合材料拉伸强度和压缩强度

Fig. 4 Tensile and compressive strength of composites under hygrothermal aging

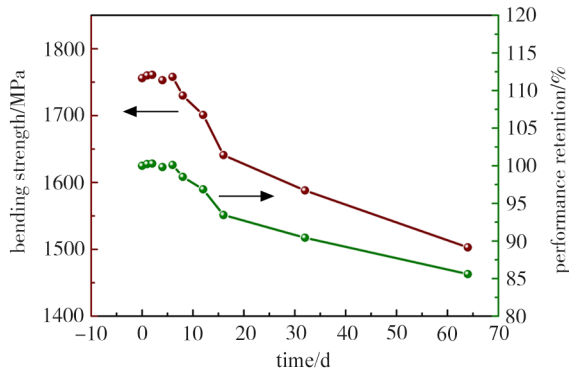
于一方面吸湿中后期进入基体的水分子增多,基体溶胀/塑化现象更加严重,导致其承受外力能力降低;另一方面水分子的渗透也损坏了纤维/基体界面,造成纤维和树脂不能作为整体受力,削弱了载荷的传递能力^[24-25]。这些因素使得老化中后期复合材料拉伸强度和压缩强度降低,也反向印证了图2(c)~(e)所示结果。

2.3.2 弯曲性能和剪切性能

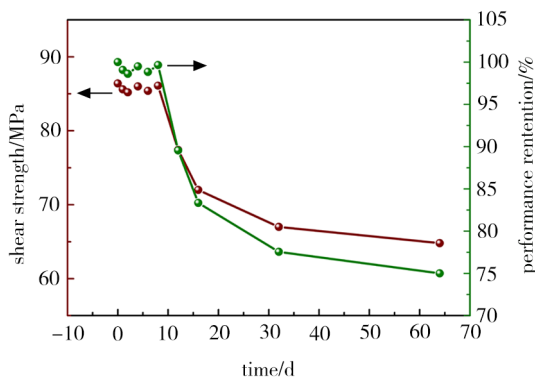
图5为T700/TDE-86复合材料湿热老化64 d的弯曲强度和剪切强度变化规律。可以看出,弯曲强度和剪切强度在老化时间内整体上呈逐渐下降的趋势。老化前期,由于树脂基体后固化作用与溶胀/塑化作用相互消减,复合材料弯曲强度和剪切强度几乎不变。老化中后期,弯曲强度由1 756 MPa下降至1 503 MPa,强度保留率约85.6%;剪切强度则由87.4 MPa下降至64.8 MPa,强度保留率仅75%。

强度下降是纤维/基体界面失效主导的,主要因素如下:一是水分对纤维/基体界面的破坏。基体吸湿导致树脂发生溶胀而产生应力,致使纤维/基体界面出现脱胶开裂现象;水分通过界面缺陷渗透形成毛细作用,吸引水分进入界面并快速扩散,破坏分子

间的相互作用,降低界面结合力^[26-27];二是增强材料与基体线胀系数差异对界面的破坏。纤维和树脂基体两者的线胀系数不同,因热膨胀变化带来的应力必然导致复合材料界面经历松弛、回复、蠕变的疲劳,造成纤维/基体界面损伤。因此,复合材料不足以承受过高的载荷,致使弯曲强度和剪切强度因界面脱粘而逐渐失效。



(a) 弯曲强度



(b) 剪切强度

图5 湿热老化下复合材料弯曲强度和剪切强度

Fig. 5 Flexural and shear strength of composites under hygrothermal aging

2.3.3 强度保留率对比

图6为T700/TDE-86复合材料不同强度保留率对比图。可以看出,湿热老化对复合材料剪切性能

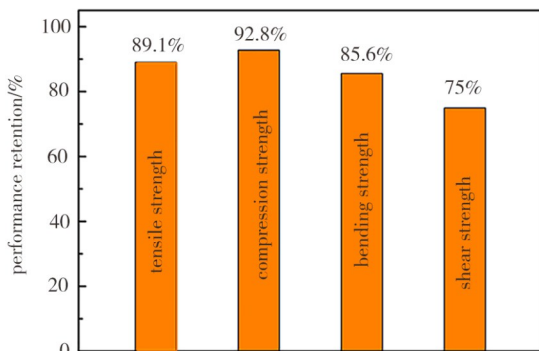


图6 不同强度保留率对比

Fig. 6 Comparison of different mechanical properties

影响最大,其强度下降率高达25%,大大超过了拉伸强度、压缩强度和弯曲强度下降率。对于T700/TDE-86复合材料而言,湿热老化主要对纤维/基体界面产生破坏,对树脂基体影响不大,而对碳纤维基本没有影响。剪切主要体现的是复合材料的界面性能,而拉伸、压缩和弯曲侧重的是纤维强度、树脂基体及其界面性能的综合表征^[14],因而T700/TDE-86复合材料剪切性能破坏更为严重。

2.4 剩余强度计算模型及寿命预测

在T700/TDE-86复合材料老化过程中,湿热作为加速老化因素致使复合材料的各种力学性能均遭受一定程度的负面影响,其中剪切强度最为严重。因此,本文选取受到环境破坏最大的项目,如剪切强度,作为复合材料寿命预测目标。通过计算湿热环境下T700/TDE-86复合材料屈服强度与初始屈服强度比值,建立了剪切强度下降率与吸湿率的非线性关系,进行了材料失效吸湿度分析,结果如图7所示。非线性关系为:

$$F=253.35\delta^2+7.06\delta \quad (4)$$

式中, F 为剪切强度下降率, δ 为吸湿率。

以剪切强度下降30%作为复合材料失效依据^[28],由式(4)计算得到材料失效时的吸湿率为0.3305%。另外,对材料吸湿率与时间进行拟合,确定线性关系为:

$$\delta=0.0751nt+0.0125 \quad (5)$$

式中, t 为湿热环境下的老化时间。依据式(5),由失效吸湿率计算得到湿热环境下的失效时间为69 d。

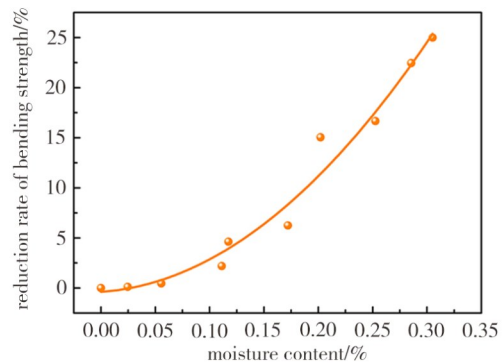


图7 剪切强度下降率与吸湿率拟合关系

Fig. 7 Fitting relationship between reduction of shear strength and moisture content

基于时温等效原理进行的湿热老化加速试验是利用提高温度来达到增加老化时间的目的,由此获得的时间并非自然环境下的老化时间。因此,需要依据时间加速系数将湿热环境下的老化时间等效为自然环境下的老化时间。时间加速系数估算公式如下^[5,29]:

$$k = \frac{t_2}{t_1} = \frac{\exp(-c/T_1\varphi_1)}{\exp(-c/T_2\varphi_2)} \quad (6)$$

式中, t_1 为自然环境下的老化时间; t_2 为湿热环境下的老化时间; T_1, φ_1 分别为自然环境下的温度和相对湿度; T_2, φ_2 分别为湿热环境下的温度和相对湿度; c 为环境系数。当湿热环境下的 $T_2 < 60^\circ\text{C}$ 时, c 取 46.1; 当湿热环境下的 $T_2 \geq 60^\circ\text{C}$ 时, c 取 81.47。本文中 T700/TDE-86 复合材料处于 $60^\circ\text{C}, 95\%RH$ 的湿热环境中进行加速老化试验, 则 c 取 81.47。以复合材料处于 $25^\circ\text{C}, 50\%RH$ 的自然环境中为例, 计算时间加速系数 k 为 6.3×10^{-3} 。将湿热环境下的失效时间代入式(6), 可得 T700/TDE-86 复合材料在 $25^\circ\text{C}, 50\%RH$ 的自然环境下的失效时间为 10 952 d, 约 30 年。

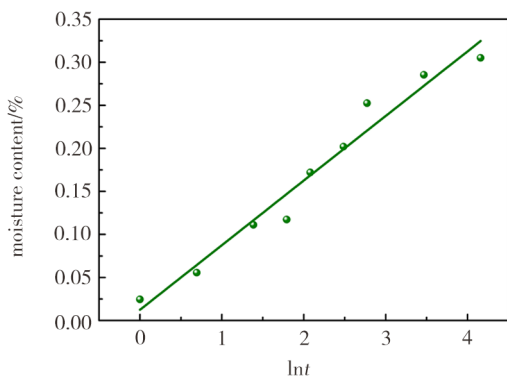


图8 吸湿率与老化时间拟合关系

Fig. 8 Fitting relationship between moisture content and aging time

3 结论

(1) 湿热老化环境中, T700/TDE-86 复合材料物理化学特性稳定, 并未产生新物质; 湿热老化对复合材料破坏方式主要为纤维/基体界面脱粘与开裂。

(2) 随着吸湿时间延长, T700/TDE-86 复合材料吸湿率逐渐增加直至趋于平缓, 吸湿率达到 0.31%; 而 T700/TDE-86 复合材料拉伸强度和压缩强度则呈现先增后减的趋势, 弯曲强度和剪切强度整体呈现下降趋势, 经过 64 d 湿热老化后的强度保留率依次为 89.1%、92.8%、85.6% 和 75%。力学性能下降的主要原因是由于纤维/基体界面遭到破坏, 削弱了界面处载荷传递的能力。

(3) 基于环境系数, 并结合剩余强度计算模型预测了 T700/TDE-86 碳纤维增强复合材料的真实老化寿命, 经计算得到 T700/TDE-86 碳纤维增强复合材料在 $25^\circ\text{C}, 50\%RH$ 自然环境下的真实老化寿命约为 30 年, 可为碳纤维增强复合材料在湿热环境中的服役安全性评估提供依据。

参考文献

[1] RAHMANI H, NAJAFI S H M, ASHORI A. 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024 年 第 3 期

Mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminated composites [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2014, 33: 733-740.

[2] 王绍凯, 马绪强, 李敏, 等. 飞行器结构用复合材料四大核心技术及发展 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(9): 76-84.

WANG S K, MA S Q, LI M, et al. Four key technologies of structural composites for aircraft applications and its development [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(9): 76-84.

[3] CHUA C Y X, LIU H C, DI T N, et al. Carbon fiber reinforced polymers for implantable medical devices [J]. Biomaterials, 2021, 271: 120719.

[4] 周骥, 丁新静, 苏亚珂. 碳纤维复合材料在轨道交通领域中的应用 [J]. 纤维复合材料, 2021, 38(4): 90-94.

ZHOU Q, DING X J, SU Y D. Application prospective of carbon fiber composite materials in Rail vehicles [J]. Fiber Composites, 2021, 38(4): 90-94.

[5] 余海燕, 吴航宇, 石慧茹. 湿热环境中碳纤维复合材料层合板的强度退化及老化寿命预测 [J]. 机械工程材料, 2021, 45(4): 40-45.

YU H Y, WU H Y, SHI H R. Strength Degradation and aging life predication for fiber carbon reinforced plomers laminates in hygrothermal environment [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(4): 40-45.

[6] BHAVESH G K, RAMAN P S, TOSHIO N. Degradation of Carbon Fiber-reinforced Epoxy Composites by Ultraviolet Radiation and Condensation [J]. Journal of Composite Materials, 2002, 36(24): 2713-2733.

[7] SELZER R, FRIEDRICH K. Mechanical properties and failure behaviour of carbon fibre-reinforced polymer composites under the influence of moisture [J]. Composites, 1997, 28: 595-604.

[8] 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: 28-34.

SUN B, LI Y. The study on hygrothermal aging behavior of composites and the predication model of durability [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2013(4): 28-34.

[9] PINGKARAWAT K, PICKERD V, GARGANO A, et al. Effect of seawater immersion on the explosive blast response of a carbon fibre-polymer laminate [J]. Composites: Part A, 2018, 109: 382-391.

[10] HADDAR N, KSOURI I, KALLEL T, et al. Effect of hygrothermal ageing on the monotonic and cyclic loading of glass fiber reinforced polyamide [J]. Polymer Composites, 2014, 35 (3): 501-508.

[11] ALMEIDA J H S, SOUZAS D B, BOTELHO E C, et al. Carbon fiber-reinforced epoxy filament-wound composite laminates exposed to hygrothermal conditioning [J]. Journal of Materials Science, 2016, 51(9): 4697-4708.

[12] WEI B, CAO H, SONG S H. Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater [J].

Corrosion Science, 2011, 53(1): 426-431.

[13] 王景泽, 彭华新. 复合材料应力-吸湿耦合行为的多尺度分析[C]. 中国力学学会固体力学专业委员会、国家自然科学基金委员会数理科学部, 2018年全国固体力学学术会议摘要集(上), 中国力学学会固体力学专业委员会、国家自然科学基金委员会数理科学部: 中国力学学会, 2018: 42-43.

WANG J Z, PENG H X. Professional Committee of Solid Mechanics of Chinese Society of Mechanics, Department of Mathematical Sciences of National Natural Science Foundation of China, Abstracts of the 2018 National Conference on Solid Mechanics (Part 1), Professional Committee of Solid Mechanics of Chinese Society of Mechanics, Department of Mathematical Sciences of National Natural Science Foundation of China: Chinese Society of Mechanics, 2018: 42-43.

[14] 王登霞, 孙岩, 谢可勇, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料模拟海洋环境长期老化及失效行为[J]. 复合材料学报, 2022, 39(3): 1353-1362.

WANG D X, SUN Y, XIE K Y, et al. Long term aging and failure behaviors of carbon fiber reinforced polymer composites in simulated marine environments [J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2022, 39(3): 1353-1362.

[15] Xu Z R, Ashbee K. Photoelastic study of the durability of interfacial bonding of carbon fiber-epoxy resin composites [J]. Journal of Materials Science, 1994, 29(2): 394-403.

[16] John F M, Sandra R. Water absorption, dimensional change and radial pressure in resin matrix dental restorative materials [J]. Bio-materials, 2004, 25: 4001-4007.

[17] 过梅丽, 肇研, 谢令. 航空航天结构复合材料湿热老化机理的研究[J]. 宇航材料工艺, 2002, 32(4): 51-54.

GUO M L, ZHAO Y, XIE L. Study on Hygrothermal Ageing Mechanisms of Aerospace Structural Composites [J]. Aerospace Materials & Technology, 2002, 32(4): 51-54.

[18] 谭翔飞, 谭鹏达, 何宇廷, 等. 航空碳纤维增强树脂基复合材料加筋壁板吸湿行为[J]. 材料工程, 2018, 46(12): 61-69.

TAN X F, TAN P D, HE Y T, et al. Moisture absorption behavior of aircraft carbon fiber reinforced resin matrix composite stiffened panel [J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(12): 61-69.

[19] Ray B C. Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites [J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2006, 298(1): 111-117.

[20] 包建文, 陈祥宝. 5284/T300复合材料湿热性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(4): 39-42.

BAO J W, CHEN X B. Study on hygrothermal properties of 5284/T300 composites [J]. Aerospace Materials & Technology, 2000, 30(4): 39-42.

[21] 卢少微, 张海军, 高禹, 等. 后固化对树脂传递模塑成型复合材料性能影响监测[J]. 光电子·激光, 2012, 23(06): 1120-1125.

LU S W, ZHANG H J, GAO Y, et al. The monitoring of influence monitoring of post curing on the properties of resin transfer molding composites [J]. Photoelectronics • Laser, 2012, 23(06): 1120-1125.

[22] 徐僖. 高分子物的溶解、溶胀及塑化作用[J]. 高分子通讯, 1959(06): 303-308.

XU X. Dissolution, Swelling and Plasticization of Polymers [J]. Polymer Bulletin, 1959(06): 303-308.

[23] 王岩, 李树茂, 景磊, 等. T800碳纤维/环氧复合材料老化性能研究[J]. 纤维复合材料, 2020, 37(2): 12-15.

WANG Y, LI S M, JING L et al. Study on aging of T800/Epoxy composites [J]. Fiber Composites, 2020, 37(2): 12-15.

[24] 马少华, 王勇刚, 回丽, 等. 湿热环境下复合材料孔板压缩性能的研究[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(6): 66-70.

MA S H, WANG Y G, HUI L, et al. Compressing property of composite laminate with hole in hygrothermal environment [J]. Aerospace Materials & Technology, 2015, 45(6): 66-70.

[25] 余治国, 杨胜春, 宋笔锋. T700和T300碳纤维增强环氧树脂基复合材料耐湿热老化性能的对比[J]. 机械工程材料, 2009, 33(6): 48-51.

YU Z G, YANG S C, SONG B F. Comparison of wet and hot aging resistance of T700 and T300 carbon fiber strengthened epoxy resin composites [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2009, 33(6): 48-51.

[26] 高坤, 史汉桥, 孙宝岗, 等. 湿热老化对玻璃纤维/环氧树脂复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2016, 33(6): 1147-1152.

GAO K, SHI H Q, Sun B G, et al. Effect of hygrothermal aging on properties of glass fiber/epoxy composites [J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2016, 33(6): 1147-1152.

[27] 栗晓飞, 张琦, 谢国君, 等. 影响碳纤维增强树脂基复合材料腐蚀重要环境因素的研究[J]. 装备环境工程, 2005, 2(6): 34-40.

LI X F, ZHANG Q, XIE G J, et al. Study of important environmental factors on the corrosion failure of the carbon/epoxy composite [J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(6): 34-40.

[28] 黄超, 陶春虎, 王占彬, 等. T300/648复合材料湿热老化行为与贮存寿命预测[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(11): 137-140.

HUANG C, TAO C H, WANG Z B, et al. T300/648 Composite material hygrothermal ageing behaviour and life prediction of storage [J]. Sichuan Ordnance Journal, 2013, 34(11): 137-140.

[29] 徐凯龙, 刘璐璐, 赵振华, 等. 循环湿热老化对T700/TDE86碳纤维复合材料层间断裂韧度的影响[J]. 航空材料学报, 2019, 39(4): 40-48.

XU K L, LIU L L, ZHAO Z H, et al. Effect of cyclic hygrothermal aging on interlaminar fracture toughness of T700/TDE86 carbon composite [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(4): 40-48.