湿热环境对纤维增强环氧树脂基复合材料层间 剪切性能的影响及寿命预测

田晓晓¹, 国青怡^{1*}, 彭高蓉²

(1.北京机械设备研究所,北京 100854; 2.火箭军装备部驻北京地区第五军事代表室,北京 100854)

摘要:目的研究湿热环境对环氧树脂基复合材料层间剪切性能的影响,并建立复合材料贮存寿命评估方法。 方法对T700碳纤维/环氧树脂复合材料与SC-1200玻璃纤维/环氧树脂复合材料进行4个温湿度条件下的加速湿热老化实验,测试了湿热老化后试件的红外光谱曲线、玻璃化转变温度和层间剪切强度。通过广义艾林模型计算材料在不同实验条件下的性能退化速率,并建立退化速率与环境温度和相对湿度的关系。结果 随着湿热老化行为的进行,复合材料的玻璃化转变温度明显下降,力学性能也发生明显降低。分析了层间剪切强度退化速率的变化规律,建立了T700碳纤维/环氧树脂复合材料与SC-1200玻璃纤维/环氧树脂复合材料 受温湿度调控的退化速率模型,并计算了特定贮存环境下,复合材料力学性能的退化速率。结论在湿热加速老化过程中,碳纤维/环氧树脂与玻璃纤维/环氧树脂单向板的性能下降明显。以层间剪切强度下降到初始性能的70%为失效判据,可以计算在温度为20℃、相对湿度为80%的环境下,T700碳纤维/环氧树脂复合材料可贮存6119.06d(16.76a),SC-1200玻璃纤维/环氧树脂复合材料可贮存7973.01d(10.39a)。 关键词:复合材料;湿热老化;碳纤维;玻璃纤维;环氧树脂;层间剪切强度;寿命预估 中图分类号:TJ04 文献标志码:A 文章编号:1672-9242(2025)05-0058-08 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.05.009

Interlaminar Shear Properties and Lifetime Estimation of Fiber-reinforced Epoxy Composites under Hygrothermal Conditions

TIAN Xiaoxiao¹, GUO Qingyi^{1*}, PENG Gaorong²

(1. Beijing Institute of Mechanical Equipment, Beijing 100854, China; 2. The 5th Military Representative Office of Rocket in Beijing Region, Beijing 100854, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the effect of hygrothermal conditions on interlaminar shear properties and predict the storage life of composite materials. Accelerated hygrothermal ageing experiments were conducted on T700 carbon fiber/epoxy resin composites and SC-1200 glass fiber/epoxy resin composites under four experimental conditions. The infrared spectra, glass transition temperatures, and interlaminar shear properties of the specimens before and after hygrothermal ageing were tested. Degradation rates of material properties under different experimental conditions were calculated with the generalized Eyring model, and the relationship between degradation rate and ambient temperature and relative humidity was estables.

收稿日期: 2025-04-07; 修订日期: 2025-05-16

Received: 2025-04-07; Revised: 2025-05-16

引文格式:田晓晓,国青怡,彭高蓉.湿热环境对纤维增强环氧树脂基复合材料层间剪切性能的影响及寿命预测[J]. 装备环境工程,2025, 22(5):58-65.

TIAN Xiaoxiao, GUO Qingyi, PENG Gaorong. Interlaminar Shear Properties and Lifetime Estimation of Fiber-reinforced Epoxy Composites under Hygrothermal Conditions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(5): 58-65.

^{*}通信作者 (Corresponding author)

lished. After hygrothermal ageing, the glass transition temperature of the composites decreased significantly, and their mechanical properties also showed a marked decrease. The variation in the degradation rate of interlaminar shear properties was analyzed, and the model for the degradation rate controlled by the temperature/relative humidity for T700 carbon fiber/epoxy resin composites and SC-1200 glass fiber/epoxy resin composites was established. The degradation rate of the composite mechanical properties under specific storage conditions was estimated. During accelerated hygrothermal ageing, the properties of carbon fiber/epoxy resin and glass fiber/epoxy resin unidirectional board degrade significantly. Based on the failure criterion defined as a reduction to 70% in interlaminar shear properties from initial mechanical properties, it can be calculated that under 20 °C/80%RH condition, T700 carbon fiber/epoxy resin composite can be stored for 6 119.06 days (16.76 years) and SC-1200 glass fiber/epoxy resin composite can be stored for 3 793.01 days (10.39 years).

KEY WORDS: composite; hygrothermal ageing; carbon fiber; glass fiber; epoxy resin; interlaminar shear properties; life prediction

环氧树脂基复合材料在热、湿、紫外光、盐雾与 风沙等环境因素作用下会发生不同程度的老化,其中温 度和湿度是影响复合材料性能最重要的环境因素[1-4]。 湿热环境可能引起环氧树脂基复合材料的老化,引起 化学或物理变化,进而导致基体和纤维界面开裂以及 力学性能的下降^[5-10]。层间剪切强度是衡量复合材料 力学性能是否良好的一个重要参数,能够有效表征复 合材料内部树脂基体与界面的黏接性。复合材料湿热 老化机理的研究表明,复合材料湿热老化会导致层间 剪切强度和材料力学性能的显著降低,并直接影响到 材料的疲劳性能,导致使用寿命减少[11-14]。尤其是湿 应力和湿应变最容易造成界面的损伤退化,导致界面 的黏结强度下降,甚至导致界面分层[15-16]。水分还会 导致树脂的溶胀变形,随着水分在基体内的扩散,材 料内部可能会产生微裂纹,导致材料刚度下降,玻璃 化转变温度降低等。在这个过程中,温度作为一种活 化因子,能够加速水分在复合材料中的扩散,温度越 高,水分子的扩散速率越快,水分对于复合材料性能 的破坏也就越显著^[4,17-18]。因此,对复合材料进行湿 热老化特性研究,揭示其材料性能与湿热环境的内在联 系,能够为复合材料产品的设计提供理论依据与指导。

要准确描述材料的老化规律,最理想的是在使用 环境中长期考察材料性能随时间的变化量,然而这样 的试验耗资、耗时巨大。为缩短试验时间,需研究引 起复合材料老化的主要环境因素、加速老化试验方 法、老化性能指标、老化寿命评估及环境防护措施, 为科学地进行加速老化试验以及预测复合材料剩余 寿命提供依据。黄超等^[19]研究了 4 个温湿度条件下 T300/648 复合材料吸湿性能、红外光谱、微观形貌及 材料力学性能的变化,分析了其湿热老化机理,发现 其剪切性能的退化速率随温湿度的升高而加快,并利用 广义艾林模型对材料贮存寿命进行了预测。孙博等^[20] 对玻璃/环氧复合材料进行了不同温度的恒温水浴老 化,发现温度越高,弯曲性能下降越显著,且老化初 期主要为纤维拉断破坏,老化后期主要为分层破坏。 测模型进行了改进。牛一凡等[21]的研究表明,基于单 一的温度场或湿度场的寿命预估模型并不能完全反 映湿热老化对材料性能的破坏,有必要设计实验针对 湿热耦合效应进行系统研究,并对实验测试的弯曲强 度随吸湿率和环境温度变化的曲线进行拟合,由此他 们建立了T700/TR1219B复合材料在全湿热场下的剩 余弯曲强度模型,对该材料在给定环境下的服役寿命 进行了预测。熊明洋^[22]研究了碳纤维/环氧层合板湿 热老化后的拉伸、压缩、弯曲性能,发现湿度的影响 大于温度,并提出了层合板损伤、吸湿模型。杨旭东 等[23]针对同一湿度不同温度环境下碳纤维增强树脂 基复合材料层合板的力学性能进行了研究,建立了不 同湿热条件下的力学性能衰退公式。谢伟等[24]在经典 层合板理论基础上引入了湿热膨胀系数的概念,建立 了材料弹性常数与湿热参数之间的函数关系,并对层 合板的损伤演化及失效模式进行了模拟。这些加速老 化实验研究为复合材料湿热老化规律与贮存寿命研 究提供了理论与方法支撑,然而加速老化实验时间较 短,且研究者大多关注单一环境因素对于材料性能的 影响,而复合材料产品的使用寿命往往长达数十年, 当前的研究不足以指导复合材料在湿热耦合环境下 长期使用、贮存时的寿命设计。此外,针对复合材料 层间剪切性能的研究依然不够充分,而表征复合材料 内部树脂基体与界面的黏接性的层间剪切性能,对于 衡量复合材料的力学性能具有重要的意义,有必要对 其开展长期的老化失效机理研究。

本文针对 T700 碳纤维/环氧树脂复合材料与 SC-1200 玻璃纤维/环氧树脂复合材料进行了长达 300 d 的加速湿热老化实验,通过质量吸湿实验、微 观断口形貌观测、红外光谱法以及动态力学分析,对 2 种复合材料的湿热老化机理进行了研究。通过湿热 老化过程中层间剪切性能的变化,研究了不同湿热条 件下材料性能的退化速率。建立了复合材料的寿命评 估模型,对给定温湿度环境下复合材料单向板进行 了贮存寿命预测,为复合材料产品的寿命设计提供 了依据。

1 实验

1.1 实验样本

实验选用东丽 T700 碳纤维/TDE-85 环氧树脂 复合材料(T板)与 SC-1200 玻璃纤维/TDE-85 环 氧树脂复合材料(G板),纤维的体积分数为60%。 老化实验后,将复合材料单向板分别装入密封袋内 调节24h后,再进行力学性能试样加工。试样的取 位区,一般距切除工艺毛边后的板材边缘30 mm 以 上。单向板的层间剪切性能试样尺寸为20 mm× 10 mm×2 mm。

1.2 湿热老化实验

采取加速老化的实验方法,确定 60 ℃、RH85% (A),60 ℃、RH70%(B),50 ℃、RH85%(C) 和 50 ℃、RH70%(D)作为湿热老化实验的 4 个加 速试验条件(见表 1)。将复合材料单向板封边处理 后分成 4 组放入确定的 4 个环境中开展加速贮存试 验,整个加速老化周期为 300 d,每隔 60 d 取样 1 次, 共取样 6 次。

表 1 湿热老化实验条件

Tab.1 Hygrothermal ageing experimental conditions				
编号	温度/℃	相对湿度/%		
А	50	70		
В	50	85		
С	60	70		
D	60	85		

1.3 实验设备

实验采用的设备名称、厂家、型号见表 2。

1.4 层间剪切实验

参照 JC/T 773—2010,采用短梁法测定层间剪切强 度,设置跨距为(10±0.3) mm,试验速度为 1 mm/min。 每组 6 个试样,所测层间剪切强度取平均值。

表 2 实验设备 Tab.2 Experimental devices 实验名称 设备名称 厂家及型号 水浴加速老化 山东欧莱博仪器有限公 恒温水浴箱 实验 司 HH-W600 湿热加速老化 苏州宝元通检测设备有 恒温恒湿箱 限公司 BYH-1000CL 实验 场发射扫描 断口微观形貌 Tescan Clara GMU 观测 电镜 力学试验机 力学性能测试 Instron-5982 动态热机械 METTLER TOLEDO 动态力学分析 分析仪 DMA/SDTA861e 差示扫描量 差示扫描量热法 TA DS25 热分析仪

2 结果及分析

2.1 湿热老化机理分析

2.1.1 断口形貌

T 单向板的层间剪切试样在不同老化时间下的 微观形貌如图 1 所示。原始试样的树脂基体表面光滑 平整,随着老化时间的延长,开裂层数逐渐增多,且 开裂位置的纤维和树脂分离。G 单向板的层间剪切试 样在不同老化时间下的微观形貌如图 2 所示。其微观 形貌变化趋势与 T 板的基本一致,也是随着老化时间 的延长,开裂层数增多。

2.1.2 红外光谱曲线

通过红外光谱法,分别对 T 板和 G 板在 60 ℃、 85%条件下老化 0、120、240 d 的试样进行测试,结 果如图 3 和图 4 所示。与未进行湿热老化的原始谱图 相比,随着老化时间的增加,红外光谱图中均没有发 现新的峰值出现,2 种材料的树脂官能团结构吸收峰 位置和吸收峰面积未见明显的变化,说明在整个湿热 加速老化过程中,其化学结构未发生变化。



a 0 d

b 120 d



图 1 碳纤维/环氧树脂复合材料试样断口的 SEM 形貌(60 ℃, RH85%) Fig.1 SEM images of fracture of carbon fiber/epoxy resin composites (60 ℃, RH85%)







图 4 玻璃纤维/环氧树脂复合材料试样的红外光谱图(60℃、RH85%) Fig.4 Infrared analysis of glass fiber/epoxy resin composites (60℃, RH85%)

2.1.3 动态力学分析

通过介质老化后的动态力学分析(Dynamic Mechanical Analysis, DMA),分别测试各取样时间段 A (50 ℃、RH70%)和D(60 ℃、RH85%)实验条件 下2种单向板的玻璃化转变温度,如图5所示。随着 老化时间的延长,T板和G板的玻璃化转变温度均呈 递减趋势,且加速条件越苛刻,下降得越快。T板和 G板在D条件(60 ℃、RH 85%)下,玻璃化转变温 度分别下降至102.62 ℃和 89.83 ℃。在整个加速老化 周期,其玻璃化转变温度分别下降了31.58 ℃和 35.97 ℃。吸湿过程中,水扩散进入树脂基体起到增 塑作用,使基体溶胀,分子间距离增大,破坏了分子 链间的范德华力,使得分子链的运动能力增强,从而 使得玻璃化转变温度下降。

2.1.4 差示扫描量热法

通过差示扫描量热法(Differential Scanning Calorimetry, DSC)分别对T板、G板在 60℃、85% 条件下老化 0、120、240 d 的试样进行测试,如图 6 所示。T板和G板分别在 102.9 ℃和 103.5 ℃左右出现一个放热峰,为环氧树脂和固化剂中的氨基发生反应,形成交联结构。DSC 主要是用来表征单向板中树脂基体的性能变化,整个加速老化过程中,DSC 曲线未见明显的区别,说明在老化过程中,基体树脂均未发生明显的化学结构变化。

2.2 贮存寿命评估分析

2.2.1 湿热老化后的层间剪切强度退化现象

在湿热老化时间为 0 (原始)、60、120、180、









图 6 复合材料的 DSC 曲线 Fig.6 DSC curves of composites: a) T board; b) G board

240、300 d 时,对每组湿热老化实验的 6 个试样进行 层间剪切实验,测试每个试样的层间剪切强度,并计 算平均值,即可得到在不同湿热条件下层间剪切强度 随时间的变化趋势,如图 7 所示。T 板和 G 板的层间 剪切强度随老化时间增加而下降,且温湿度越高,下 降速率越快。在 D 条件(60 ℃、RH85%)下,T 板 层间剪切强度由 69.38 MPa 降低至 45.6 MPa,下降了 34.24%;G 板层间剪切强度的下降速率大于T 板,由 68.9 MPa 降低至 45.48 MPa,下降了 33.99%。4 个温 湿度的条件下, 层间剪切强度下降速率依次为: (60 ℃、RH85%), (50 ℃、RH85%), (60 ℃、 RH70%), (50 ℃、RH70%)。

2.2.2 复合材料的寿命评估模型

高分子材料在老化过程中,力学性能 P 与老化时间 t 的关系用式(1) 描述:

$$P = P_0 e^{-kt} \tag{1}$$

式中: P₀为材料的初始性能; k 为与温度、湿度



图 7 不同老化条件下两种环氧树脂复合材料的层间剪切强度



有关的退化速率。本文的老化实验使用温度与湿度 2 种加速应力,想要利用实验得到的高应力水平下的寿 命特征外推正常应力水平下的寿命特征,关键是建立 加速寿命特征与加速应力水平的模型。考虑到温度与 湿度之间的相互作用,选用广义艾林模型作为湿热老 化寿命预测模型:

$$k = \frac{A}{T} e^{\frac{B}{KT}} e^{H\left(C + \frac{D}{KT}\right)}$$
(2)

式中: *k* 为力学性能的退化速率; *T* 为热力学温度; *H* 为相对湿度; *K* 为玻尔兹曼常数; *A*、*B*、*C*、*D* 为待定常数。该模型为非线性模型, 对两边取对数可以得到线性形式:

$$\ln kT = \ln A + \frac{B}{K}\frac{1}{T} + CH + \frac{D}{K}\frac{1}{T}H$$
(3)

使用层间剪切强度实验数据对式(1)进行拟合, 可以得到不同湿热条件下的退化速率 k,代入式(3), 即可得到该复合材料受湿热老化影响的寿命评估模型。

T 板和 G 板在 4 个温湿度条件下的层间剪切强度 随时间的变化规律见表 3。将计算的退化速率 k 代入 式(3),可得 T 板和 G 板层间剪切强度退化速率与 温度、湿度的关系:

 $\ln kT = -65.89 + \frac{20\ 051.53}{T} + 103.54H - 32\ 760.02\frac{H}{T}$ (4)

$$\ln kT = -70.86 + \frac{21\,973.28}{T} + 110.98H - 35\,345.40\frac{H}{T}$$
(5)

表 3 不同温湿度条件下层间剪切强度的 广义艾林模型参数

Tab.3 Generalized Erying model parameters under different temperature and relative humidity conditions

实验环境	T 板		G 板	
	P_0	k	P_0	k
50 ℃、RH70%	68.66	0.000 301	66.51	0.000 539
50 ℃、RH85%	60.43	0.000 414	62.43	0.000 680
60 ℃、RH70%	67.71	0.000 382	65.72	0.000 676
60 ℃、RH85%	59.63	0.000 828	61.31	0.001 396

拟合的曲面如图 8 所示,实验值用红色标注。将 自然贮存条件代入式(4)和式(5),即可计算复合 材料在该环境下贮存时的层间剪切强度退化速率。以 温度 20 ℃、相对湿度 80%环境为例,可以计算在该 贮存环境下,T700碳纤维/环氧树脂复合材料(T板) 的层间剪切强度退化规律:

 P = 69.38e^{-0.000 058t}
 (6)

 SC-1200 玻璃纤维/环氧树脂复合材料(G板)的

 层间剪切强度退化规律:

$$P = 68.90 \,\mathrm{e}^{-0.000\ 094t} \tag{7}$$



图 8 退化速率的曲面拟合图 Fig.8 Fitting surface of degradation rate: a) T board; b) G board

以层间剪切强度下降到初始性能的 70%为失效 判据,根据式(6)和式(7)可以计算,在该环境下, T700碳纤维/环氧树脂复合材料的贮存寿命为 6119.06d(16.76a),SC-1200玻璃纤维/环氧树脂复 合材料的贮存寿命为 3793.01d(10.39a)。可以发现, 具有相同纤维体积分数和环氧树脂基体的 2 种复合 材料,SC-1200玻璃纤维复合材料的层间剪切强度退 化速率高于 T700碳纤维复合材料。复合材料强度的 影响因素很多,包括纤维与基体的强度和物理性质、 纤维形状和分布情况以及纤维体积含量等。此外,复 合材料的制造工艺也会引起纤维分布的不均匀、孔 隙、残余温度应力以及不同界面强度等。通过理论分 析,可以初步估计纤维和基体的各种性能对于单向纤 维复合材料强度的影响^[1]。对于体积含量、基体相同 的2种复合材料,其力学性能的差异主要受增强纤维 力学性能的影响。碳纤维的强度高于玻璃纤维,即碳 纤维强度在复合材料宏观强度中的占比高于玻璃纤 维,湿热环境主要作用于基体材料和界面,而对纤维 的影响较小。从宏观来看,则表现为 T700 碳纤维/ 环氧树脂复合材料受湿热环境的影响小于 SC-1200 玻璃纤维/环氧树脂复合材料。本文对碳纤维/环氧树 脂复合材料与玻璃纤维/环氧树脂复合材料温度、湿 度双因素调节的宏观层间剪切力学性能老化行为进 行了一系列实验研究,但复合材料的老化行为离不开 对纤维、界面、残余应力等微观结构与力学机理的影响,需要研究者进一步深入研究,并对当前的理论进行扩展与修正。

3 结论

本文系统构建了复合材料力学性能湿热老化规 律及贮存寿命评估方法,并通过实验对T700碳纤维/ 环氧树脂复合材料与SC-1200玻璃纤维/环氧树脂复 合材料的湿热老化行为进行了研究。在 60 ℃、 RH85%,60 ℃、RH70%,50 ℃、RH85%和50 ℃、 RH70%等4个实验条件下,进行了300 d内2种复合 材料的加速湿热老化实验。

1)随着老化时间的延长,复合材料层间剪切试 件破坏后的开裂层数逐渐增多,且开裂位置的纤维和 树脂分离。

2)在整个湿热加速老化过程中,材料的化学结构 未发生变化,其老化行为主要是通过物理变化控制的。

3)随着湿热老化的进行,水分子扩散使基体溶胀,破坏了分子链间的范德华力,宏观表现为材料的 玻璃化转变温度明显下降与力学性能的下降。

4)通过对不同老化时间下 4 组温湿度条件层间 剪切强度的拟合,得到了层间剪切强度退化速率的变 化规律,并建立了 T700碳纤维/环氧树脂复合材料与 SC-1200 玻璃纤维/环氧树脂复合材料受温湿度调控 的退化速率模型。

5) 以层间剪切强度下降到初始性能的 70%为失 效判据, 以温度 20 ℃、相对湿度 80%环境为例, T700 碳纤维/环氧树脂复合材料的贮存寿命为 6 119.06 d (16.76 a), SC-1200 玻璃纤维/环氧树脂复合材料的 贮存寿命为 3 793.01 d (10.39 a)。

参考文献:

 沈观林, 胡更开. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学 出版社, 2006.
 SHEN G L, HU G K. Mechanics of Composite Materi-

als[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

- [2] 郑路,常新龙,赵峰,等.湿热环境中复合材料吸湿性研究[J]. 纤维复合材料,2007,24(2):37-39.
 ZHENG L, CHANG X L, ZHAO F, et al. Research on Moisture Absorption of Composites in the Hydrothermal Environment[J]. Fiber Composites, 2007, 24(2): 37-39.
- [3] 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.
- [4] RAY B C. Temperature Effect during Humid Ageing on Interfaces of Glass and Carbon Fibers Reinforced Epoxy

Composites[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, 298(1): 111-117.

[5] 冯宇,何宇廷,安涛,等.湿热环境对航空复合材料加 筋板压缩屈曲和后屈曲性能的影响[J].材料工程, 2015,43(5):81-88.

FENG Y, HE Y T, AN T, et al. Influence of Hygrothermal Environment on Compressive Buckling and Post-Buckling Performance of Aero Composite Stiffened Panel[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(5): 81-88.

[6] 张晓云,曹东,陆峰,等.T700/5224复合材料在湿热环境和化学介质中的老化行为[J].材料工程,2016,44(4):82-88.
ZHANG X Y, CAO D, LU F, et al. Aging Behavior of T700/5224 Composite in Hygrothermal Environment and

T700/5224 Composite in Hygrothermal Environment and Chemical Media[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(4): 82-88.

- [7] 徐晋伟.不同环境因素作用下T700/6421复合材料老化 机理研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013.
 XU J W. Study on Aging Mechanism of T700/6421 Composites under Different Environmental Factors[D].
 Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013.
- [8] 回丽,张旭,许良,等.不同湿热条件下碳纤维/QY9611 复合材料湿热性能研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(1): 190-192.
 HUI L, ZHANG X, XU L, et al. Research on Hygrothermal Property of Carbon Fiber/QY9611 Compo-

site under Different Hygrothermal Conditions[J]. New Chemical Materials, 2016, 44(1): 190-192.

 [9] 马少华,王勇刚,回丽,等. 湿热环境对碳纤维环氧树 脂复合材料弯曲性能的影响[J]. 材料工程,2016,44(2): 81-87.
 MA S H, WANG Y G, HUI L, et al. Influence of

MA S H, WANG Y G, HUI L, et al. Influence of Hygrothermal Environment on Flexural Property of Carbon Fiber Epoxy Composite[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(2): 81-87.

- [10] 王勇刚. 复合材料吸湿行为与力学性能研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.
 WANG Y G. Study on Moisture Absorption Behavior and Mechanical Properties of Composites[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2016.
- [11] SUN P, ZHAO Y, LUO Y F, et al. Effect of Temperature and Cyclic Hygrothermal Aging on the Interlaminar Shear Strength of Carbon Fiber/Bismaleimide (BMI) Composite[J]. Materials & Design, 2011, 32(8/9): 4341-4347.
- [12] LV X Y, WANG R G, LIU W B, et al. Surface and Interface Properties of Carbon Fiber Composites under Cyclical Aging[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(24): 10459-10464.
- [13] BOTELHO E C, PARDINI L C, REZENDE M C. Evaluation of Hygrothermal Effects on the Shear Properties of Carall Composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 452: 292-301.
- [14] LYU X Y, WANG R G, LIU W B, et al. Surface and Interface Properties of Carbon Fiber Composites under Cyclical Aging[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(24):

10459-10464.

- [15] 冯青,李敏,顾轶卓,等.不同湿热条件下碳纤维/环氧 复合材料湿热性能实验研究[J].复合材料学报,2010, 27(6):16-20.
 FENG Q, LI M, GU Y Z, et al. Experimental Research on Hygrothermal Properties of Carbon Fiber/Epoxy Resin Composite under Different Hygrothermal Conditions[J].
- [16] KALFON E, HAREL H, MAROM G, et al. Delamination of Laminated Composites under the Combined Effect of Nonuniform Heating and Absorbed Moisture[J]. Polymer Composites, 2005, 26(6): 770-777.

Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(6): 16-20.

- [17] 李静. 纤维增强树脂基复合材料的吸湿性和湿变形[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(2): 69-74.
 LI J. Moisture Absorption and Soaking Deformation of Fiber Reinforced Resin Composites[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2010, 31(2): 69-74.
- [18] 刘雪蓉, 徐元铭, 张卫方, 等. 碳纤维增强树脂基复合 材料湿热老化研究进展[J]. 纤维复合材料, 2020, 37(4):
 20-25.
 LIU X R, XU Y M, ZHANG W F, et al. Research Progress of Hydrothermal Aging of Carbon Fiber Reinforced

gress of Hydrothermal Aging of Carbon Fiber Reinforced Resin Matrix Composites[J]. Fiber Composites, 2020, 37(4): 20-25.

- [19] 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]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013, 34(11): 137-140.
- [20] 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.

SUN B, LI Y. The Study on Hygrothermal Aging Behavior of Composites and the Prediction Model of Durability[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2013(4): 29-35.

- [21] 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 Y F, LI Z Q, ZHU X F. Flexural Properties and Life-Time Estimation of Carbon Fiber/Epoxy Composite under Hygrothermal Conditions[J]. Acta Materiae
- Compositae Sinica, 2020, 37(1): 104-112. [22] 熊明洋. 湿热环境对碳纤维树脂基层合板的力学性能 影响研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017. XIONG M Y. Study on the Influence of Hot and Humid Environment on the Mechanical Properties of Carbon Fiber Resin-Based Laminates[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017.
- [23] 杨旭东,安涛,邹田春,等. 湿热环境对碳纤维增强树 脂基复合材料力学性能的影响及其损伤机理[J]. 材料 工程,2019,47(7):84-91.
 YANG X D, AN T, ZOU T C, et al. Effect of Hygrothermal Environment on Mechanical Properties and Damage Mechanism of CFRP[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(7): 84-91.
- [24] 谢伟, 窦鹏鹏, 薛展. 湿热环境下复合材料层合板本构 模型研究及其应用[J]. 航空工程进展, 2019, 10(1): 62-72.

XIE W, DOU P P, XUE Z. Research and Application of the Constitutive Model of Composite Laminates in Hydrothermal Environments[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(1): 62-72.