

# 防热复合材料湿热老化行为与贮存寿命研究

郭文莹<sup>1</sup>, 仲莹莹<sup>1</sup>, 郑玉侠<sup>1</sup>, 李轩<sup>1</sup>, 赵起越<sup>1</sup>, 吴昊<sup>1</sup>,  
张昕<sup>1</sup>, 李天梅<sup>2\*</sup>, 李彬<sup>3</sup>, 姚美琪<sup>1</sup>

(1. 航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854; 2. 火箭军工程大学 智剑实验室, 西安 710025;  
3. 北京机电工程总体设计部, 北京 100039)

**摘要:** **目的** 研究装备用防热复合材料在贮存条件下的性能变化规律和寿命评估。**方法** 在 90 °C/90%RH、80 °C/90%RH、70 °C/90%RH 和 80 °C/80%RH 共 4 个试验条件下, 对玻璃纤维增强酚醛树脂防热复合材料开展加速湿热老化试验, 借助红外光谱分析、扫描电镜、导热系数和力学性能测试研究老化过程中材料的质量、导热系数、力学性能、化学组分、微观形貌的变化规律, 使用 Peck 模型对材料的贮存寿命进行计算。**结果** 材料在老化初期吸湿后, 质量快速增加, 吸湿趋于饱和后, 质量达到最大值。随着老化时间的延长, 材料的质量呈缓慢下降趋势。不同湿热条件下, 材料的导热系数未出现性能退化现象, 材料的拉伸强度均出现退化现象, 老化温度越高, 性能下降越明显。在 90 °C/90%RH 条件下, 老化时间为 80 d 时, 材料强度大约下降到初始性能的 53.4%。湿热老化过程中, 红外光谱中 960 cm<sup>-1</sup> 处特征峰逐渐减弱, 直至完全消失, 1 098 cm<sup>-1</sup> 处特征峰相对强度逐渐变强。湿热老化后, 材料部分玻璃纤维与基体间界面有微裂纹产生, 拉伸断裂后, 大部分纤维从树脂基体中拔出, 表面平整光滑, 黏连树脂较少。**结论** 防热复合材料的老化是由氧化反应的化学老化与湿热条件导致界面脱黏、基体开裂、微裂纹等物理老化综合作用的结果。防热复合材料在 20 °C/60%RH 条件的贮存寿命为 36.3 a, 满足实际构件的设计寿命。

**关键词:** 防热复合材料; 玻璃纤维; 酚醛树脂; 湿热老化; 力学性能; 微观形貌; 化学组分; 贮存寿命

中图分类号: TJ04 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2024)07-0053-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.07.007

## Heat and Humid Aging Behaviour and Storage Life of Heat-Resistance Composite Materials

GUO Wenying<sup>1</sup>, ZHONG Yingying<sup>1</sup>, ZHENG Yuxia<sup>1</sup>, LI Xuan<sup>1</sup>, ZHAO Qiyue<sup>1</sup>, WU Hao<sup>1</sup>,  
ZHANG Xin<sup>1</sup>, LI Tianmei<sup>2\*</sup>, LI Bin<sup>3</sup>, YAO Meiqi<sup>1</sup>

(1. Aerospace Science & Industry Corp Defense Technology R & T Center, Beijing 100854, China; 2. Zhijian Laboratory, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China; 3. Beijing System Design Institute of Electro-Mechanic Engineering, Beijing 100039, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the performance change law and evaluate the service life of heat-resistance composite materials for weapons under storage conditions. Accelerated aging test was conducted to study the change law of weight, ther-

收稿日期: 2024-05-21; 修订日期: 2024-06-01

Received: 2024-05-21; Revised: 2024-06-01

引文格式: 郭文莹, 仲莹莹, 郑玉侠, 等. 防热复合材料湿热老化行为与贮存寿命研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(7): 53-59.

GUO Wenying, ZHONG Yingying, ZHENG Yuxia, et al. Heat and Humid Aging Behaviour and Storage Life of Heat-resistance Composite Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(7): 53-59.

\*通信作者 (Corresponding author)

mal conductivity, mechanical properties, chemical composition, microstructures of glass fiber reinforced phenolic resin heat-resistance composite materials under 4 conditions of 90 °C/90%RH, 80 °C/90%RH, 70 °C/90%RH and 80 °C/80%RH, via IR, SEM, thermal conductivity and mechanical property test and Peck model was used to calculate the storage life of materials. At the beginning of aging, the weight of materials increased rapidly and reached a maximum value after moisture absorption tended to saturation. With the increase of aging time, the weight decreased gradually. Meanwhile, there was no change on thermal conductivity, but the mechanical properties of materials decreased under different heat and humid conditions. The properties decreased obviously with the increase of temperature. For example, for the aging time of 80 days under the condition of 90 °C/90%RH, the strength of materials decreased to the 53.4% of the initial value. During the heat and humid aging, the characteristic peak of 960  $\text{cm}^{-1}$  in IR spectroscopy weakened gradually until completely vanished. The relative intensity of the characteristic peak at 1 098  $\text{cm}^{-1}$  gradually increased. During the aging, micro-cracks were observed between glass fiber and primary structure of materials and most glass fibers were pulled out from the primary structure of resin after tensile failure, with the smooth surface and less bonded resin. The aging of heat-resistance materials is caused by chemical aging of thermal degradation and oxidation, physical aging by surface unsticking, cracking of primary materials and micro-cracks under heat and humid conditions. The storage life of heat-resistance materials is 36.3 years under 20 °C/60%RH, meeting the designed storage life of practical structure.

**KEY WORDS:** heat-resistance material; glass fiber; phenolic resin; heat and humid aging; mechanical properties; microstructure; chemical composition; storage life

由于耐热复合材料具有优异的耐高温、耐烧蚀性能、热稳定性、低热导率以及轻质化的优点,被广泛用于航天飞行器的外隔热层和内隔热层,防止装备高速飞行产生的大量气动热向内部传导,导致装备出现结构强度下降、设备故障失效甚至烧毁等重大问题<sup>[1-2]</sup>。航天装备具有长期贮存,一次使用的特点<sup>[3]</sup>。长期贮存时,在温度、湿度、氧气、辐射和盐雾等贮存环境因素的影响下<sup>[4-11]</sup>,树脂基复合材料通常出现老化问题,其中温度和湿度的影响极为明显。在老化过程中,树脂基复合材料基体的化学组分、微观结构以及应力状态等往往会发生变化<sup>[12-20]</sup>,导致材料的物理性能和力学性能下降。因此,开展耐热复合材料在贮存环境中的老化行为与贮存寿命预测研究具有十分重要的意义。

目前,国内外对于复合材料在湿热环境中的长期服役性能、老化机理及其贮存寿命预测开展了大量研究<sup>[21-27]</sup>。Foulc等<sup>[11]</sup>研究了玻璃纤维增强复合材料的力学性能随湿热老化时间的变化规律,分析了水分子对基体与玻纤之间界面的破坏过程,阐明了材料湿热老化机理。Chilali等<sup>[12]</sup>选取2种典型的热塑性树脂基与热固性树脂基复合材料,在深入研究了不同纤维编制方式对水分子三维扩散的影响后,优化了3D-Fick与Langmuir水分扩散模型。黄超等<sup>[21]</sup>研究了T300/648复合材料在湿热条件下力学性能的变化规律,分析了其湿热老化机理,应用广义艾林模型预测了T300/648环氧树脂基复合材料的贮存寿命。李晖等<sup>[22]</sup>针对玻璃纤维增强复合材料,通过统计分析材料性能与不同地区环境因素以及老化时间的映射关系,对玻璃纤维增强复合材料的寿命进行了预测。陈

源等<sup>[22]</sup>研究获得了包装箱用碳纤维增强复合材料产品的冲击强度在不同温度条件下的变化规律,运用Arrhenius方程,评估了该材料在不同环境条件下的贮存寿命。牛一凡等<sup>[26]</sup>针对T700/TR1219B碳纤维/环氧树脂复合材料,研究了弯曲性能的变化规律,分析了吸湿率、环境温度的单一及协同作用,探究了湿热老化机理,提出了全湿热场下剩余弯曲强度的寿命预测模型。然而,目前复合材料的湿热老化与寿命预测研究主要集中在环氧树脂基或双马树脂基复合材料,针对酚醛树脂基耐热复合材料的研究相对较少。随着低密度防隔热酚醛树脂基复合材料的进一步开发应用<sup>[1]</sup>,对其湿热老化行为及寿命评估的研究显得越发重要。

本文以装备用玻璃纤维增强酚醛树脂耐热复合材料为研究对象,开展了不同湿热条件下的加速老化试验,通过研究材料的力学性能、导热系数、化学组分及微观形貌的变化情况,分析了材料的湿热老化机理,并利用Peck加速老化模型,对其贮存寿命进行了评估。

## 1 试验

### 1.1 材料

耐热复合材料为玻璃纤维增强酚醛树脂基复合材料,在装备中起隔热作用。玻璃织物预制体在使用前用丙酮在Soxhlet提取器中抽提48h,干燥后在0.5%硅烷偶联剂KH550的乙醇溶液中处理30min,105 °C干燥2h。采用RTM工艺制备玻璃/酚醛复合材料,在20kPa的压力下将体积分数为60%的醛树脂

溶液注入预先填充玻璃预制体的模具中, 在 110 °C 保温 50 min, 然后在 170 °C 固化 3 h。根据 GB/T 1447—2005, 将酚醛树脂基玻璃纤维复合材料加工成 180 mm×20 mm×4 mm 的哑铃状拉伸试样, 试样表面未做密封处理, 试样形貌如图 1 所示。

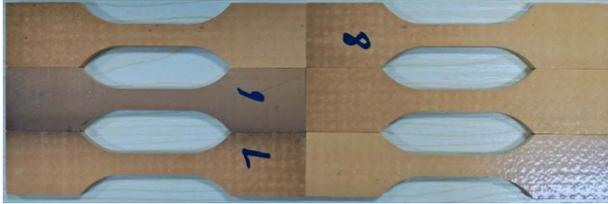


图 1 耐热复合材料的力学性能试样  
Fig.1 Mechanical properties sample of heat-resistance composite material

## 1.2 方法及条件

使用重庆银河的 SDH401F 恒定湿热试验箱, 开展湿热老化试验, 湿热老化条件见表 1。每种试验条件下设置 5 个平行拉伸试样。

表 1 老化试验条件  
Tab.1 Aging test conditions

温度/°C	相对湿度/%	老化时间/d
90	90	0、5、20、40、60、80
80	90	0、7、28、56、84、112
70	90	0、10、40、80、120、150
80	80	0、14、28、49、63、77

## 1.3 质量变化试验

湿热老化试验过程中, 按照表 1 湿热老化试验周期, 采用电子分析天平对试样进行称量, 观察试样质量变化情况。质量变化率按式 (1) 计算:

$$M_t = [(m_t - m_0) / m_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $M_t$  为试样质量变化率,  $m_0$  为试样初始质量,  $m_t$  为湿热老化  $t$  后的试样质量。

## 1.4 导热系数测试

采用美国 TA 公司的 DTC-300 导热仪, 按照 GB/T 10295—2008, 测试耐热复合材料不同湿热老化试验后的导热系数, 每组 3 个试样, 取其平均值。测试温度为 50 °C。

## 1.5 力学性能测试

采用三思公司 5105 电子万能试验机 (配置 Epsilon 3542 型精密引伸计), 按照 GB/T 1447—2005, 测试耐热复合材料不同湿热老化试验后的拉伸强度和弹性模量等力学性能, 每组 5 个拉伸试样, 取其平均值。试验中加载速度为 2 mm/min。

## 1.6 红外光谱分析 (FT-IR)

在湿热老化后的试样表面刮取少量树脂基体粉末, 与 KBr 粉末均匀混合并研磨后, 放入专用夹具中压制红外测试用的薄片。最后采用日本岛津 IRAffinity-1 傅里叶红外变换光谱仪对制备好的试样进行检测, 获得材料的红外光谱, 研究复合材料的化学组分随湿热老化时间的变化情况。

## 1.7 扫描电镜观察 (SEM)

将湿热老化试验后的拉伸试样的断口切成小块后, 在观察位置粘贴导电胶布和喷金处理。采用德国蔡司 Gemini SEM 300 场发射扫描电镜观察试样表面和断口的微观形貌, 研究湿热老化过程对复合材料老化机理的影响。

## 2 结果与讨论

### 2.1 质量变化情况

不同湿热老化条件下, 耐热复合材料的质量随老化时间的变化曲线如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 不同湿热老化条件下, 耐热复合材料质量呈现相同的变化趋势。在老化初期, 材料的质量快速增加, 当老化时间在 20~40 d 时, 材料质量达到最高值。随着老化时间的延长, 材料的质量呈缓慢下降趋势。在相对湿度为 90% 条件下, 提高试验温度, 材料老化初期的质量增加速率增大, 达到最大增质量的时间越短, 但 70、80、90 °C 温度下达到的最大增质量基本都在 1.7% 左右。在老化后期, 试验温度越高, 材料质量下降率越大。在 80 °C 条件下, 相对湿度从 90% 降低至 80% 后, 材料老化初期的质量增加速率下降, 达到的最大增质量下降, 为 1.4% 左右。在老化后期, 80 °C/90%RH 和 80 °C/80%RH 条件下的材料质量下降率基本相同, 说明老化后期, 材料的质量变化主要受温度的影响。

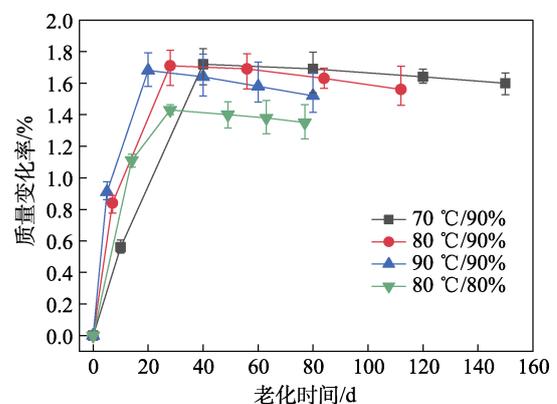


图 2 耐热复合材料随老化时间的质量变化情况  
Fig.2 Weight change of heat-resistance composite material with aging time

在湿热老化条件下,一方面,水分子通过扩散和/或毛细作用,逐渐渗入到耐热复合材料树脂基体内,偏聚于树脂基体、树脂与纤维界面等处的微小裂纹缺陷处,造成材料吸湿增质量<sup>[9-10,17-18]</sup>。另一方面,高温使酚醛基体发生氧化反应,产生挥发性气体<sup>[23]</sup>,使复合材料质量下降。在老化初期,由于本材料为低密度复合材料,材料内部有较多的内部缺陷和裂纹,复合材料吸湿速率较快,而氧化相对较慢,因此整体表现为材料质量增加。随着老化时间延长,材料达到吸湿饱和状态后,由于酚醛基体氧化反应继续进行,材料的质量呈缓慢下降状态。

## 2.2 导热系数

在不同湿热条件下,耐热复合材料的导热系数随老化时间的变化趋势如图3所示。从图3中可以看出,耐热复合材料的导热系数随着老化时间延长未出现明显的变化趋势,不同湿度条件下,材料的导热系数基本上皆小于其初始值  $0.1189 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,在  $-9.80\%$ ~ $+0.51\%$ 波动变化。由于导热系数下降,可降低产品内部热量传递速率,是有利于材料的防隔热作用。因此,本材料的导热系数未出现性能退化现象,说明材料的导热系数受湿热老化的影响较小。

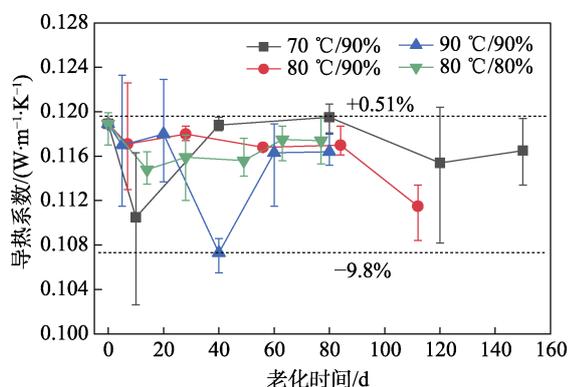


图3 在不同湿热条件下耐热复合材料的导热系数随老化时间的变化情况

Fig.3 Change of thermal conductivity of heat-resistance composite materials with aging time under different humid and heat conditions

## 2.3 力学性能

在不同湿热条件下,耐热复合材料的拉伸强度和弹性模量随湿热老化时间的变化曲线如图4所示。从图4中可以看出,在  $70\text{ °C}/90\%\text{RH}$  条件下,随着老化时间的增加,材料的强度先略有增加,随后逐渐下降;在  $80\text{ °C}/90\%\text{RH}$ 、 $90\text{ °C}/90\%\text{RH}$  和  $80\text{ °C}/80\%\text{RH}$  条件下,材料的拉伸强度呈现逐渐下降的趋势。在不同湿热条件下,材料的弹性模量整体呈先上升、后下降的趋势,这可能与材料老化初期存在后固化效应有关。在相对湿度为  $90\%\text{RH}$  条件下,增加试验温度,

材料的拉伸强度下降速率明显升高。在  $90\text{ °C}/90\%\text{RH}$  条件下,当老化时间为  $80\text{ d}$  时,材料强度大约下降到初始性能的  $53.4\%$ 。

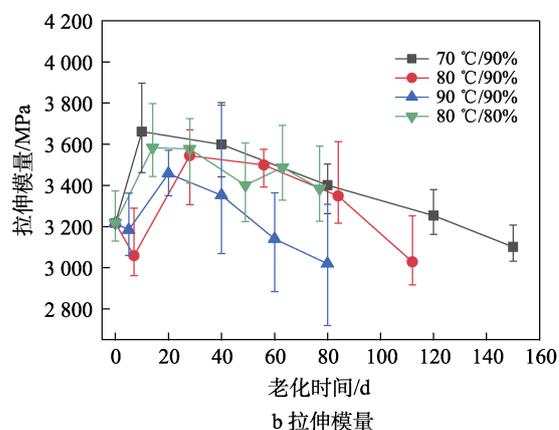
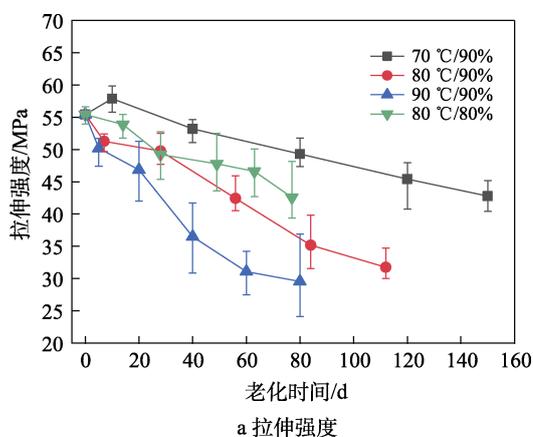


图4 在不同湿热条件下耐热复合材料的力学性能随老化时间的变化情况

Fig.4 Change of mechanical properties of heat-resistance composite materials with aging time under different humid and hot conditions: a) tensile strength; b) tensile modulus

## 2.4 红外分析 (FT-IR)

在  $90\text{ °C}/90\%\text{RH}$  湿热条件下老化不同时间后,耐热复合材料的红外图谱如图5所示。图谱中,  $1654\text{ cm}^{-1}$  和  $1602\text{ cm}^{-1}$  为苯环的骨架伸缩振动峰,  $1474\text{ cm}^{-1}$  为链烷— $\text{CH}_2$ —中  $\text{C—H}$  剪切振动峰,  $1142\text{ cm}^{-1}$  为苯环面内弯曲振动峰,其中苯环位置受湿热的影响较小。以此为内标后发现,随着老化时间的延长,  $960\text{ cm}^{-1}$  处特征峰相对强度逐渐减弱。当老化时间为  $80\text{ d}$  时,特征峰完全消失,  $1098\text{ cm}^{-1}$  处特征峰相对强度逐渐变强。推测为其中较弱的  $\text{C—H}$  ( $960\text{ cm}^{-1}$ ) 变为不稳定的激发状态,在较高温度中,亚甲基与氧发生化学反应,最终转变为  $\text{C—OH}$  ( $1098\text{ cm}^{-1}$ ),说明树脂的端基部分发生氧化。

## 2.5 微观形貌观察

耐热复合材料老化前后的 SEM 照片如图6所示。

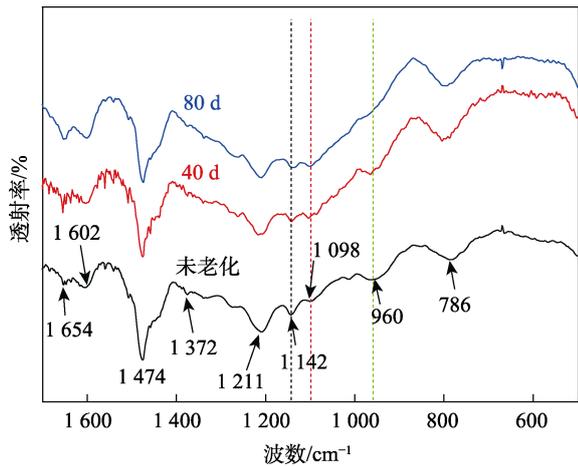


图 5 耐热复合材料在 90 °C/90%RH 湿热条件下不同老化时间后的红外图谱

Fig.5 FT-IR spectra of heat-resistance composite materials for different aging time under humid and hot condition of 90 °C/90%RH

从图 6a 中可知, 材料未老化前, 酚醛树脂与玻璃纤维较好地黏连, 部分区域在玻璃纤维之间的树脂呈颗粒形状。经 90 °C/90%RH 湿热条件下老化 80 d 后, 从图 6b、c 中可知, 在纤维之间的大量酚醛树脂呈颗粒形状, 部分玻璃纤维与基体间界面有微裂纹。从图 6d 可知, 拉伸断裂后, 大部分纤维从树脂基体中抽出, 黏连树脂较少, 表面平整光滑。这说明在湿热条件下, 水分子进入材料内部后, 偏聚于微小裂纹缺陷处, 会助长材料内部原有缺陷和裂纹的扩展, 长时间的老化作用必然导致纤维与基体间界面处产生微裂纹, 造成严重破坏, 导致纤维与基体脱黏<sup>[10,18-19]</sup>, 基体破裂, 产生颗粒。同时, 在高温高湿条件下, 由于基体与纤维的热膨胀系数不一致, 以及树脂基体吸湿溶胀, 基体与纤维的收缩存在巨大差异, 导致耐热复合材料内部产生残余应力<sup>[17]</sup>。这些应力致使界面损伤, 造成力学性能下降明显, 并且温度越高, 力学性能下降越快。

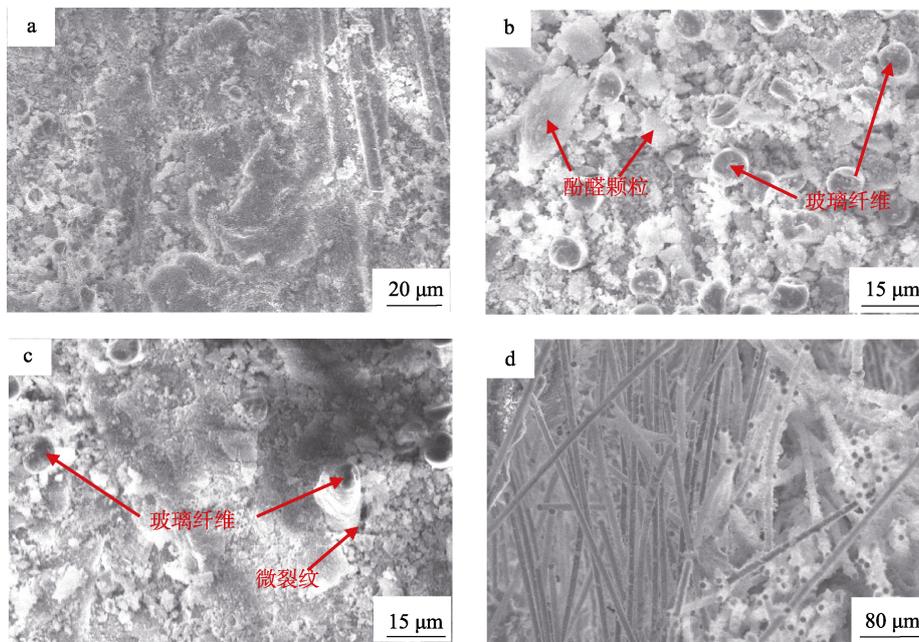


图 6 耐热复合材料老化前后的微观形貌 SEM 照片

Fig.6 SEM images of heat-resistance composite materials before and after aging

### 3 加速模型选择及寿命预测

根据上述老化机理分析, 耐热复合材料在整个试验过程老化机理未发生明显变化, 在湿热环境条件下, 可选用温度-湿度双应力 Peck 模型<sup>[24]</sup>, 其反应速率表达式为:

$$K = AR_H^n \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2)$$

式中:  $K$  表示在温度应力为  $T$  和相对湿度应力为  $R_H$  条件下的退化速率;  $A$  为常数;  $E_a$  为材料激活能, 与材料有关;  $R$  为气体常数,  $R=8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ;  $n$

为逆幂指数。

对该模型进行线性化处理, 以便于使用过程中拟合与外推, 对式 (2) 两边取对数, 可得:

$$\ln K = \ln A + n \ln R_H - \frac{E_a}{RT} \quad (3)$$

在湿热老化过程中, 耐热复合材料的拉伸强度性能变化规律, 可用指数衰减模型进行拟合:

$$P = P_0 \exp(-Kt) \quad (4)$$

式中:  $P$  为材料  $t$  时刻的力学性能;  $P_0$  为材料的初始性能;  $K$  为退化速率;  $t$  为老化时间。

文中材料的拉伸强度具有良好的性能退化规律,

因此选取拉伸强度开展贮存寿命预测。利用式(4)可以得到不同湿热条件下材料拉伸强度与老化时间的拟合方程,见表2。

表2 耐热复合材料拉伸强度与老化时间的拟合方程  
Tab.2 Fitted equation of tensile strength and aging time of heat-resistance composite materials

环境条件	拟合方程	相关系数
90 °C/90%RH	$P=53.41\exp(-0.008\ 14t)$	$ r =0.955\ 17$
80 °C/90%RH	$P=55.12\exp(-0.004\ 99t)$	$ r =0.979\ 17$
70 °C/90%RH	$P=57.76\exp(-0.002\ 94t)$	$ r =0.976\ 05$
80 °C/80%RH	$P=55.36\exp(-0.003\ 19t)$	$ r =0.939\ 11$

将表2中计算得到的4个温湿度条件的退化速率 $K$ 代入式(3),计算可得寿命预测模型为:

$$\ln K = -4.440\ 5 + 3.8 \ln R_H - \frac{52\ 715}{8.314T} \quad (5)$$

取温湿度条件为20 °C/60%RH,代入式(5),并结合式(4),可得到20 °C/60%RH条件下拉伸强度与老化时间的拟合方程:

$$P = 55.42\exp(-0.000\ 026\ 94t) \quad (6)$$

以拉伸强度的下降率30%作为失效判据,根据式(6)可计算得出耐热复合材料在20 °C/60%RH条件的贮存寿命为36.3 a,满足实际构件的设计寿命。

## 4 结论

1) 在老化初期,材料吸湿后质量快速增加,吸湿饱和后,质量达到最大值。随着老化时间的延长,材料质量呈缓慢下降趋势。

2) 不同湿热条件下,材料的导热系数未出现性能退化现象,拉伸强度出现退化现象,老化温度越高,拉伸强度下降越明显。

3) 材料在试验过程中发生了氧化等化学老化。水分子渗入材料内部后,对纤维与基体间界面产生了严重破坏,使得纤维与基体发生脱黏。

4) 使用Peck模型计算得到耐热复合材料在20 °C/60%RH条件下的贮存寿命为36.3 a,满足实际构件的设计寿命,可为耐热复合材料在贮存条件的使用可靠性提供相关依据。

### 参考文献:

- [1] 李仲平. 耐热复合材料发展与展望[J]. 复合材料学报, 2011, 28(2): 1-9.  
LI Z P. Major Advancement and Development Trends of TPS Composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(2): 1-9.
- [2] 王静, 杨杰, 赵文斌. 航天飞行器外耐热复合材料发展概况[J]. 材料导报, 2018, 32(S2): 425-429.  
WANG J, YANG J, ZHAO W B. Development of External Thermal Protection Composites for Spacecraft[J]. Materials Reports, 2018, 32(S2): 425-429.
- [3] 董军超, 胡恩来, 韩铭. T800 复合材料弹体结构湿热环境贮存寿命研究[J]. 环境技术, 2020, 38(S1): 98-103.  
DONG J C, HU E L, HAN M. Study on Storage Life of T800 Composite Projectile Structure in Hot and Humid Environment[J]. Environmental Technology, 2020, 38(S1): 98-103.
- [4] 彭雷, 张建宇, 鲍蕊, 等. 湿热、紫外环境对 T300/QY8911 复合材料孔板静力性能的影响[J]. 复合材料学报, 2009, 26(3): 18-23.  
PENG L, ZHANG J Y, BAO R, et al. Effects of Hygrothermal and Ultraviolet Conditions on Static Properties of T300/QY8911 Laminated Composites Containing an Open Hole[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(3): 18-23.
- [5] 杨阳, 王璇, 章妮, 等. 玻璃纤维/酚醛材料的热氧老化对热物性的影响及机理研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(9): 102-104.  
YANG Y, WANG X, ZHANG N, et al. Effect of Accelerated thermo-Oxidative Aging on Thermal Physics Properties of Glass Fiber/Phenol Composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(9): 102-104.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 王国建, 孙耀宁, 蒋万乐. 玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料在温湿和紫外辐照环境中的老化行为[J]. 机械工程材料, 2018, 42(9): 11-15.  
WANG G J, SUN Y N, JIANG W L. Aging Behavior of Glass Fiber Reinforced Epoxy Resin Composite in Warm-Wet and Ultraviolet Irradiation Environment[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2018, 42(9): 11-15.
- [9] 张静, 张琦, 马会平, 等. G827/5224 和 G803/5224 碳纤维增强环氧树脂湿热老化的研究[J]. 装备环境工程, 2008, 5(3): 16-20.  
ZHANG J, ZHANG Q, MA H P, et al. Study of Hydrothermal Aging of Carbon Fiber/Epoxy Resin Composites G827/5224, G803/5224[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(3): 16-20.
- [10] 张凤玲, 宋体杰, 马克明, 等. T300/QY8911 复合材料湿热行为的研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(2): 32-35.  
ZHANG F L, SONG T J, MA K M, et al. Hydrothermal Behaviors of T300/QY8911 Composites[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(2): 32-35.
- [11] FOULC M P, BERGERET A, FERRY L, et al. Study of Hygrothermal Ageing of Glass Fibre Reinforced PET Composites[J]. Polymer Degradation and Stability, 2005,

- 89(3): 461-470.
- [12] CHILALI A, ASSARAR M, ZOUARI W, et al. Effect of Geometric Dimensions and Fibre Orientation on 3D Moisture Diffusion in Flax Fibre Reinforced Thermoplastic and Thermosetting Composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 95: 75-86.
- [13] PAPANICOLAOU G C, KOSMIDOU T V, VATALIS A S, et al. Water Absorption Mechanism and Some Anomalous Effects on the Mechanical and Viscoelastic Behavior of an Epoxy System[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, 99(4): 1328-1339.
- [14] 王晓洁, 梁国正, 张炜, 等. 湿热老化对高性能复合材料性能的影响[J]. *固体火箭技术*, 2006, 29(4): 301-304.  
WANG X J, LIANG G Z, ZHANG W, et al. Effects of Hydrothermal Aging on Properties of High-Performance Composites[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2006, 29(4): 301-304.
- [15] 石增强. 芳纶纤维/环氧树脂的湿热老化[J]. *宇航材料工艺*, 2008, 38(5): 1-3.  
SHI Z Q. Hygrothermal Aging of Aramid Fibre/Epoxy Resin Composite Material[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2008, 38(5): 1-3.
- [16] MOUZAKIS D E, ZOGA H, GALIOTIS C. Accelerated Environmental Ageing Study of Polyester/Glass Fiber Reinforced Composites (GFRPCS)[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2008, 39(3): 467-475.
- [17] 刘建华, 曹东, 张晓云, 等. 树脂基复合材料 T300/5405 的吸湿性能及湿热环境对力学性能的影响[J]. *航空材料学报*, 2010, 30(4): 75-80.  
LIU J H, CAO D, ZHANG X Y, et al. Influence of Hygrothermal Environment on Absorption and Mechanical Properties of Advanced Composite T300/5405[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2010, 30(4): 75-80.
- [18] 樊俊铃, 马国庆, 焦婷, 等. 温度和湿度对碳纤维增强复合材料老化影响研究综述[J]. *航空科学技术*, 2023, 34(9): 1-13.  
FAN J L, MA G Q, JIAO T, et al. Review on the Effects of Temperature and Moisture on the Aging of Carbon Fiber Reinforced Polymers[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34(9): 1-13.
- [19] 魏程, 王威力, 李刚, 等. 环氧树脂/玻璃纤维复合材料加速湿热老化机理研究[J]. *纤维复合材料*, 2023, 40(2): 58-62.  
WEI C, WANG W L, LI G, et al. Study on the Mechanism of Accelerated Hydrothermal Aging of Epoxy/Glass Fiber Composites[J]. *Fiber Composites*, 2023, 40(2): 58-62.
- [20] 王威力, 魏程, 田晶. 碳纤维复合材料的湿热老化模型研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2023(11): 44-48.  
WANG W L, WEI C, TIAN J. Research on Hygrothermal Ageing Models of Carbon Fiber Composites[J]. *Composites Science and Engineering*, 2023(11): 44-48.
- [21] 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.
- [22] 李晖, 张录平, 孙岩, 等. 玻璃纤维增强复合材料的寿命预测[J]. *工程塑料应用*, 2011, 39(1): 68-73.  
LI H, ZHANG L P, SUN Y, et al. Prediction of Service Life of the Glass Fibre Reinforced Composite[J]. *Engineering Plastics Application*, 2011, 39(1): 68-73.
- [23] 袁瑾. 玻璃纤维/酚醛烧蚀耐热材料贮存老化性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
YUAN J. Research on the Aging of Glass Fiber/Phenolic Ablative Material in Storage[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [24] 赵云峰, 许文. 航天产品非金属材料/制品贮存寿命评估技术[J]. *宇航材料工艺*, 2015, 45(6): 17-21.  
ZHAO Y F, XU W. Shelf Life Prediction Technology of Nonmetallic Materials/Parts Applied in Aerospace Industry[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2015, 45(6): 17-21.
- [25] 陈源, 李小平, 罗勇, 等. 包装箱用碳纤维增强复合材料贮存寿命研究[J]. *装备环境工程*, 2018, 15(8): 111-114.  
CHEN Y, LI X P, LUO Y, et al. Storage Life of Carbon Fiber Reinforced Composite of Packing Box[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2018, 15(8): 111-114.
- [26] 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.
- [27] 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 Prediction for Carbon Fiber Reinforced Polymers Laminates in Hygrothermal Environment[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2021, 45(4): 40-45.