

引用格式:王翔,王波,贾普荣,等.复合材料开孔板湿热及压缩力学行为[J].材料工程,2025,53(11):223-230.
WANG Xiang, WANG Bo, JIA Purong, et al. Hygrothermal and compressive mechanical behavior of composites plate with open-hole[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(11): 223-230.

复合材料开孔板湿热及压缩力学行为

Hygrothermal and compressive mechanical behavior of composites plate with open-hole

王翔¹,王波^{2*},贾普荣³,张宇⁴,锁永永³,黄峰⁴

(1 中国航发北京航空材料研究院 航空材料检测与评价北京市重点实验室,北京 100095;2 西北工业大学 航空学院,西安 710072;

3 西北工业大学 力学与土木建筑学院,西安 710129;

4 中国航空制造技术研究院 复合材料技术中心,北京 101300)

WANG Xiang¹, WANG Bo^{2*}, JIA Purong³, ZHANG Yu⁴,

SUO Yongyong³, HUANG Feng⁴

(1 Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2 School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 3 School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China; 4 Composite Technology Centre, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 101300, China)

摘要:湿热环境常导致树脂基复合材料的力学性能出现明显下降。对 T700/BP9916 复合材料开孔板进行湿热老化实验,并对老化前后的试样进行压缩实验,得到相应的开孔压缩强度。通过 ABAQUS 有限元软件模拟试样湿热后残余应力分布,并基于复合材料的吸湿膨胀行为和力学性能与吸湿率的线性关系对吸湿前后的开孔压缩实验进行模拟计算。结果表明:T700/BP9916 复合材料的吸湿过程表现出典型的菲克扩散行为,湿热后开孔压缩最大载荷下降约 5.2%。湿热后复合材料的内部应力较小,对强度无实际影响。FEM 模拟得到的相对质量增量-时间曲线与实验曲线吻合性较好,未吸湿环境下开孔压缩最大载荷模拟计算值与实验值的相对误差仅为 0.88%,湿热环境下相对误差为 6.21%,误差增加原因为模拟计算过程中仅考虑湿热效应与材料性能线性下降关系。

关键词:T700/BP9916;湿热老化;开孔压缩;力学性能;有限元分析模拟

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2023.000177 CSTR: 32421.14.j.issn.1001-4381.2023.000177

中图分类号:TB332 文献标识码:A 文章编号:1001-4381(2025)11-0223-08

Abstract: The mechanical properties of polymer matrix composites often decrease due to hygrothermal environment. The hygrothermal aging tests and the compression tests are carried out before and after aging on the T700/BP9916 composites plate with open-hole, and the open-hole compression(OHC) strength is obtained. The residual stress distribution in the specimen after hygrothermal aging is simulated by ABAQUS software. Based on the hygrothermal expansion behavior and linear relationship between mechanical properties and the moisture absorption, OHC tests before and after hygrothermal aging are simulated. The results show that the moisture absorption of the T700/BP9916 composites have typical Fick diffusion behavior, and the maximum load of the OHC after hygrothermal aging decreases by

approximately 5.2%. The internal stress caused by hygrothermal aging is very small and have no impact on the strength. The relative mass increment-time curve of moisture absorption obtained from the FEM simulation is in good agreement with the experimental. The relative error of maximum load of OHC test between the simulated and the experimental value is only 0.88% with non-hygrothermal aging, and the relative error is 6.21% during the hygrothermal environment. The increase in error is due to the fact that only the linear relationship between hygrothermal effect and the linear decline of material properties is considered in the simulation calculation.

Key words: T700/BP9916; hygrothermal aging; open-hole compression; mechanical property; finite element analysis simulation

碳纤维增强树脂基复合材料具有较高的比强度、比模量和较好的耐腐蚀、耐疲劳等性能,因此在航空、航天飞行器结构件中的应用越来越广。然而,在存贮或使用过程中,树脂基复合材料的基体材料从外界环境中吸收水分,纤维和基体的吸湿性能相差较大以及复合材料的各向异性,导致复合材料内部产生湿热残余应力,这对其力学性能造成很大的影响^[1-3]。因此,有必要深入了解碳纤维增强树脂基复合材料的吸湿过程,研究材料的吸湿量和内部水分分布情况,同时确定材料的吸湿行为对材料力学行为的影响,这对复合材料在湿热环境中的老化分析以及构件的服役寿命预测极其重要。

目前,对树脂基复合材料湿热效应的研究主要采用实验方法,该方法操作周期长、数据分散性大。饱和吸湿老化后树脂基复合材料力学性能的下降程度与材料吸湿量的大小呈正相关,对于未达到饱和吸湿的树脂基复合材料,一方面水分浓度分布不均匀,另一方面水分对各组分材料的影响也不相同,导致无法用吸湿量来评估湿热环境对复合材料力学性能的影响趋势。有限元方法可以对吸湿过程中水分分布规律对复合材料力学行为的影响进行研究,并可对复合材料吸湿后的力学行为进行模拟。国内外学者研究了湿热环境对材料内部造成的残余应力或微观损伤,并对复合材料的力学性能进行了预测。Vaddadi等^[4]通过建立具有各向异性微结构的有限元模型,计算由湿热环境导致的复合材料内因组分膨胀不均匀而引起的内应力场情况,结果表明,纤维高密度区域的应力水平降低,且随着吸湿量的增大,应力幅值会随之增大,较大的应力可能会引起基体损伤或纤维和基体间的分层。Morii等^[5]将由湿热老化引起的纤维和基体间的脱粘假设为内部损伤,引入损伤参数,建立内部损伤情况与由湿热老化导致材料质量损失之间的关系,通过有限元分析法和损伤力学方法,计算由于湿热老化作用造成的玻璃纤维复合材料弹性模量的下降情况,结果表明,玻璃纤维增强树脂基复合材料由于湿热老化导致的模量下降与纤维和基体的脱

粘有关。Mercier等^[6]通过实验方法获得不同厚度树脂基复合材料的吸湿数据和吸湿后力学性能的下降规律,并利用数值方法研究了湿热环境对复合材料拉伸性能的影响,认为可以通过数值模拟对整个吸湿过程中材料性能的下降情况进行预测,并据此对结构厚度进行优化。王登霞等^[7]对CF/TDE85分别进行不同时间水浸和盐雾老化,发现随着老化时间增加,拉伸强度基本不变,弯曲、压缩及剪切强度下降较大。周松等^[8]分别在去离子水和3.5%(质量分数)NaCl溶液中对T800/环氧树脂基复合材料进行30天老化,发现在两种老化环境中压缩强度的下降幅度基本一致。冯振宇等^[9]对T700/3228复合材料进行三种湿热条件下的湿热老化,发现相同湿度下,随着环境温度的升高,吸湿初期层板的吸湿速率和吸湿率增大,达到吸湿平衡的时间延长,平衡吸湿量增大;随着温度及湿度升高,压缩强度下降。贾少澎等^[10]研究了不同湿热老化条件后T700/3228的 0° 拉伸和压缩性能随温度、湿度的变化规律,并给出了拉伸强度和压缩强度随温度、湿度的经验估算公式,估算值与实验值误差较小。闫伟等^[11]通过考虑湿热效应的经典层合板理论,在载荷项中引入由湿热效应引起的热载荷项和湿载荷项,建立湿-热-力耦合下复合材料宏观性能的定量表达式,实现在有限元分析中考虑湿热效应对复合材料力学行为的影响。

本工作对吸湿前后的开孔复合材料试样进行压缩实验,并利用有限元模拟软件ABAQUS对湿热环境下复合材料的吸湿行为和吸湿残余应力进行有限元模拟,获得吸湿曲线以及材料内部水分分布和残余应力分布情况,并在此基础上对吸湿前后开孔复合材料试样的压缩行为进行模拟。

1 实验材料及模拟

1.1 实验材料

实验材料为碳纤维增强树脂复合材料T700/BP9916,铺层方式为 $[+45/0/-45/90]_{5s}$ 。图1为开孔压缩(open-hole compression, OHC)试样示意图。

试样为 ASTM 标准试样, 试样长度为 300 mm, 中心孔距端面长度为 150 mm, 宽度为 36 mm, 中心孔距端面宽度为 18 mm, 试样厚度为 5.0 mm, 中心孔的直径为 6.0 mm, 宽径比为 6, 直径厚度比为 1.2。湿热实验采用同工艺状态下的跟踪件进行质量监控, 跟踪件为矩形直条, 长度为 100 mm, 宽度为 30 mm。

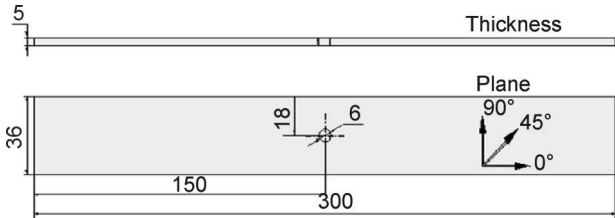


图 1 开孔压缩试样示意图
Fig.1 Schematic diagrams of OHC sample

1.2 湿热实验和开孔压缩实验

湿热前先将试样放置于 80 °C 烘箱内进行 164 h 烘干, 达到烘干未吸湿状态。湿热实验主要采用恒温水浸方法进行, 将试样和跟踪件放入 70 °C 恒温水浴 (电热恒温三用水箱, Cr42) 中进行湿热老化, 每隔 24 h 将跟踪件取出, 用滤纸擦干表面水分后, 立即用电子天平 (FA2004B, 精度 0.01 mg) 称重, 记录测量结果, 称重后将跟踪件迅速放回恒温水浴箱中。

分别对复合材料烘干未吸湿试样和吸湿试样按照 ASTM D 6484/D 6484M-2004 进行开孔压缩性能测试 (电子万能试验机 DNS-100), 加载速度为 2 mm/min。

1.3 吸湿有限元模拟

研究表明^[12-13], 控制复合材料吸湿过程的主要机制为依靠浓度梯度驱动的水分扩散行为, 且吸湿过程主要受环境温度和相对湿度的影响。目前, 常用来描述复合材料吸湿过程的理论主要为菲克模型^[14]:

$$\begin{cases} \frac{\partial c}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \\ c = c_i (0 < x < h; t \leq 0) \\ c = c_0 (x = 0, x = h; t > 0) \end{cases} \quad (1)$$

式中: c 为水分浓度, %; t 为时间, h; D_x 为 x 方向的扩散率; c_i 为任一时刻 i 时的水分浓度, %; h 为试样沿 x 方向的厚度, mm; c_0 为零时刻即初始试样水分浓度, %。

有限元软件 ABAQUS 的质量扩散 (mass diffusion) 模块可进行吸湿模拟计算。质量扩散分析可以模拟一种物质在另一种物质中的瞬态或稳态扩散过程, 还可以模拟受浓度梯度、温度梯度或压力梯度驱动的扩散过程。质量扩散模块的控制方程是菲克方程 (Fick's equations) 的扩展形式, 基本求解变量 (即网

格节点的自由度) 是“归一化浓度 (normalized concentration)”, 即扩散物质发生扩散的驱动力 ϕ , 其定义为:

$$\phi = m/s \quad (2)$$

式中: m 为扩散物质的质量浓度, $g \cdot cm^{-3}$; s 为扩散物质在基体中的溶解度系数, $g \cdot cm^{-3}$ 。当网格包含共享节点的不同物质时, 归一化浓度在不同物质间的界面上仍然连续。

在 ABAQUS/Standard 中, 菲克定律是一般化学势关系的特例。为了建立菲克定律与一般化学势的关系, 菲克定律被改写为:

$$J = -D \cdot \left(s \frac{\partial \phi}{\partial x} + \phi \frac{\partial s}{\partial x} \right) \quad (3)$$

式中: J 为扩散通量, $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 。

大多数实际情况下, $s = s(\theta)$, 式(3)可写为:

$$J = -sD \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} - D \cdot \frac{c}{s} \frac{\partial s}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (4)$$

式中 θ 为温度。式(4)中第一项描述了由归一化浓度驱动的扩散行为, 第二项描述了由温度梯度驱动的扩散行为。其中, 第一项与一般表达式一致。在质量扩散模块中, 可以定义分析过程为稳态分析或瞬态分析。稳态质量扩散分析可以直接提供稳态解值, 即饱和和吸湿状态, 而瞬态扩散分析则可以根据时间增量输出相应的扩散结果。

本工作针对 T700/BP9916 复合材料的固定吸湿实验进行有限元模拟。使用 ABAQUS 有限元软件建立 T700/BP9916 材料开孔压缩试样的几何模型, 尺寸为 300 mm × 36 mm × 5 mm, 包含直径为 6 mm 的圆形开孔。计算模型为实际试样的四分之一, 其示意图如图 2 所示。

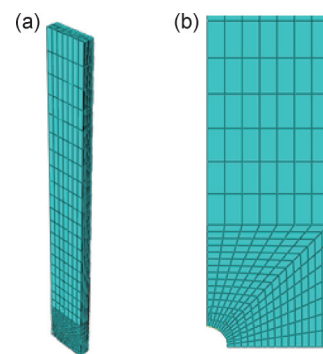


图 2 吸湿实验使用的有限元模型示意图
(a) 整体模型; (b) 孔处网格细化

Fig.2 Schematic diagrams of finite element models for moisture absorption test
(a) complete model; (b) mesh refinement at hole

为了保证计算精度, 确定网格单元类型为 DC3D8, 有限元模型的单元总数为 14000。有限元计

算的总时间为2000 h,分为200个增量步。与其他物理过程相比,吸湿过程相对缓慢,材料表面会长时间存在较大的水分浓度梯度,因此,理解复合材料的瞬态吸湿过程非常重要。对扩散过程采用瞬态分析,可以得到吸湿过程的吸湿曲线和复合材料内部水分随时间的变化情况。

为了得到实际试样内不同铺层的吸湿状态,进而更好地了解由吸湿导致的材料性能下降情况,按照试样的实际铺层情况对有限元模型进行铺设,铺层顺序为 $[+45/0/-45/90]_{55}$ 。各单层均为各向异性材料,且吸湿属性^[15]主要包括扩散率($D_{11}=0.0147 \text{ mm}^2/\text{h}$, $D_{22}=D_{33}=0.0038 \text{ mm}^2/\text{h}$)和溶解度系数($s=1.02$)。

使用ABAQUS软件对水分在复合材料中的扩散行为进行分析时,模型的每个节点只包含一个自由度,即水的浓度值。对模型6个表面均设置质量浓度边界条件,即为表面接触环境的归一化浓度值。当 $t=0$ 时,表示还未开始吸湿,此时试样表面的水分浓度为0。当 $t>0$ 时,由于水分子通过试样的外表面逐步扩散进入试样内部,因此可将接触湿环境表面(试样外表面)的边界条件定义为饱和吸湿量的归一化浓度,即为1。此外,由于模型的对称性,还需要在各对称截面上设置对称边界条件。

1.4 开孔压缩有限元模拟

碳纤维增强树脂基复合材料的基本失效模式主要分为基体控制失效模式和纤维控制失效模式,基于这种差异,判据使用两个损伤变量来描述在纤维和基体中的初始损伤。

纤维控制失效模式:

$$f_f = \sqrt{\frac{\epsilon_{11}^t}{\epsilon_{11}^c} (\epsilon_{11})^2 + (\epsilon_{11}^t - \frac{(\epsilon_{11}^t)^2}{\epsilon_{11}^c}) \epsilon_{11}} \quad (5)$$

$$C_d = \begin{bmatrix} (1-d_f)C_{11} & (1-d_f)(1-d_m)C_{12} & (1-d_f)C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & (1-d_m)C_{22} & (1-d_f)(1-d_m)C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & (1-d_f)(1-d_m)C_{44} & 0 & 0 \\ & & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: C_d 为损伤发生后的刚度矩阵; C_{12} 为1与2方向正应变-应力耦合关系刚度系数; C_{13} 为1与3方向正应变-应力耦合关系刚度系数; C_{23} 为2与3方向正应变-应力耦合关系刚度系数; C_{33} 为厚度方向的刚度系数; C_{55} 为23方向的刚度系数; C_{66} 为12方向的刚度系数。

将刚度下降后的单元作为一个新的单元带入模型继续计算,直到达到最大载荷,即认为模型发生破

坏。采用ABAQUS软件的静力分析模块分别对未吸湿和吸湿344 h的复合材料开孔压缩实验进行模拟,基于图2模型,并使用UMAT用户子程序定义材料的失效判据以及由湿热效应引起的材料性能下降关系。344 h吸湿试样的模拟以前面得到的吸湿量作为分析的初始条件。

式中: f_f 为纤维失效; ϵ_{11} 为平行纤维方向的失效应变;上标t为拉伸;上标c为压缩。

$$\begin{aligned} \epsilon_{11}^t &= \sigma_L^t / C_{11}, \\ \epsilon_{11}^c &= \sigma_L^c / C_{11} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: σ_L 为平行纤维方向的应力; C_{11} 为平行纤维方向的刚度系数。

当 $f_f > \epsilon_{11}^t$ 时,纤维失效发生。引入纤维损伤变量 d_f 为:

$$d_f = 1 - \frac{\epsilon_{11}^t}{f_f} e^{-\frac{C_{11}\epsilon_{11}(f_f - \epsilon_{11}^t)}{G_f}} \quad (7)$$

式中: G_f 为纤维模量。

基体控制失效模式:

$$f_m = \sqrt{\frac{\epsilon_{22}^t}{\epsilon_{22}^c} (\epsilon_{22})^2 + (\epsilon_{22}^t - \frac{(\epsilon_{22}^t)^2}{\epsilon_{22}^c}) \epsilon_{22} + \left(\frac{\epsilon_{22}^t}{\epsilon_{12}^s}\right)^2 (\epsilon_{12})^2} \quad (8)$$

式中: f_m 为基体失效; ϵ_{22} 为垂直纤维方向的失效应变;上标s为剪切。

$$\begin{aligned} \epsilon_{22}^t &= \sigma_T^t / C_{22}, \\ \epsilon_{22}^c &= \sigma_T^c / C_{22}, \\ \epsilon_{12}^s &= \tau_{L,T}^s / C_{44} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: σ_T 为垂直纤维方向的应力; C_{22} 为垂直纤维方向的刚度系数; $\tau_{L,T}^s$ 为剪切应力; C_{44} 为13方向剪切刚度系数。

当 $f_m > \epsilon_{22}^t$ 时,基体失效发生。引入基体损伤变量 d_m 为:

$$d_m = 1 - \frac{\epsilon_{22}^t}{f_m} e^{-\frac{C_{22}E_m^s(f_m - \epsilon_{22}^t)}{G_m}} \quad (10)$$

式中: G_m 为基体模量。

随着损伤发生,有效刚度矩阵根据两个变量 d_f 和 d_m 下降为:

表1为室温环境下T700/BP9916复合材料单向板的力学性能,其中 E 为拉压模量, G 为剪切模量, ν 为泊

松比, X_t 为纵向拉伸强度, X_c 为纵向压缩强度, Y_t 为横向拉伸强度, Y_c 为横向压缩强度, S 为剪切强度。本工作假设材料在吸湿过程中未对组分材料造成损伤, 且材料力学性能下降只与吸湿量有关, 力学性能包括纵向拉伸和压缩强度、横向压缩强度、纵向模量、剪切强

度和模量的影响, 吸湿量的下降近似表示为线性关系^[16], 吸湿引起的材料性能下降线性表达式如式 (12) 所示。通过吸湿量与材料性能下降之间的关系, 可以在 UMAT 子程序中定义材料在吸湿和损伤共同作用下的折减刚度矩阵。

表 1 室温下复合材料单向板的力学性能

Table 1 Mechanical properties of composite unidirectional plate at room temperature

E_{11}/GPa	E_{22}/GPa	E_{33}/GPa	G_{12}/GPa	G_{13}/GPa	G_{23}/GPa	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	X_t/MPa	X_c/MPa	Y_t/MPa	Y_c/MPa	S/MPa
117	9.47	9.47	4.9	4.9	3.59	0.32	0.32	0.32	2360	1130	50	190	110

$$\begin{cases} Y_t/Y_t^0 = 1 - 0.244C \\ X_c/X_c^0 = 1 - 0.194C \\ Y_c/Y_c^0 = 1 - 0.177C \\ S/S^0 = 1 - 0.0869C \\ E_{11}/E_{11}^0 = 1 - 0.118C \\ G_{12}/G_{12}^0 = 1 - 0.114C \end{cases} \quad (12)$$

式中: 上标 0 为未吸湿状态。

2 数据处理及结果分析

2.1 实验数据处理

按式 (12) 计算和记录每隔 24 h 间隔的跟踪件质量增量。当跟踪件的质量增量平均值小于 0.01% 时, 可认为材料达到有效吸湿平衡, 记录有效平衡吸湿量。

$$M_i = \frac{W_i - W_0}{W_0} \times 100\% \quad (13)$$

式中: M_i 为 i 时刻跟踪件的相对质量增量, %; W_i 为 i 时刻跟踪件的质量, g; W_0 为吸湿前跟踪件的质量, g。

2.2 湿热实验结果分析

图 3 为 T700/BP9916 复合材料的典型吸湿曲线。可以看出, 经过约 1600 h 的吸湿后, 材料逐渐达到饱和和吸湿, 此时吸湿量约为 1.0%。吸湿过程表现出两个典型阶段: 第一阶段 (吸湿时间小于 900 h), 材料的吸湿速率较快, 其相对质量增量与时间的平方根呈线性增加关系。这是因为, 在温度和湿度的共同作用下, 由于材料自身存在的缺陷, 导致水分能较快地被吸收。第二阶段 (吸湿时间大于 900 h), 材料的吸湿速率明显变缓, 且质量增量越来越小, 逐渐趋于平衡。这主要是因为, 此阶段逐渐达到饱和吸湿, 水分子在材料内部分散运动降低, 说明 T700/BP9916 材料的吸湿过程表现出典型的菲克扩散行为。

2.3 开孔压缩实验结果分析

图 4 为 OHC 未吸湿环境和吸湿热老化后的压缩载荷-位移曲线。可以看到, 吸湿前后位移-载荷曲线

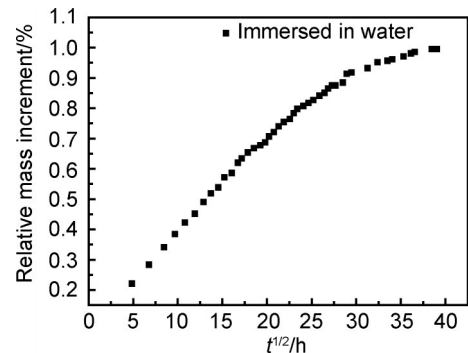


图 3 T700/BP9916 复合材料的相对质量增量-时间曲线

Fig.3 Curves of relative mass increment versus time of T700/BP9916 composites

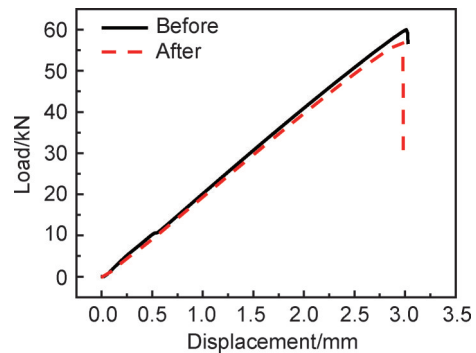


图 4 吸湿前后 OHC 的压缩载荷-位移曲线

Fig.4 Load-displacement curves of OHC before and after hygrothermal aging

相似, 即在失效前都保持了较好的线性特征。然而, 吸湿后试样的刚度有所下降, 这主要是由树脂基体软化导致的。此外, 吸湿后的开孔压缩最大载荷也出现一定程度的下降, 降幅约为 5.2%。

2.4 吸湿模拟结果分析

数值模拟 (FEM) 和实验得到的吸湿曲线, 如图 5 所示。可以看出, FEM 计算得到的曲线与实验曲线吻合性较好, 344 h 吸湿后试样相对质量增量为 0.6271%, 继续吸湿至 5500 h 左右, 吸湿过程逐渐趋于平衡, 相对质量增加约 1.02%。

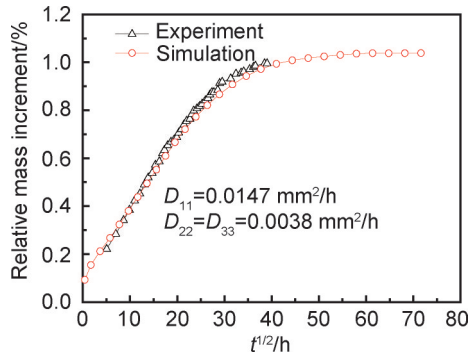


图5 实验与仿真模拟得到的相对质量增量-时间曲线

Fig.5 Curves of relative mass increment versus time obtained by experiment and simulation

图6为不同时刻OHC试样内部的吸湿浓度分布云图,图中CONC代表水分浓度梯度。可以看出,当吸湿时间为344 h时,试样内部水分浓度梯度仍然很大,且水分浓度由边缘向中心逐渐降低;此外,由于开孔处直接接触湿环境,因此也出现水分集中现象。随着吸湿时间的增加,试样内部的水分浓度梯度逐渐减小,当吸湿时间达到5500 h时,整个试样基本呈现出

饱和吸湿状态,且水分浓度梯度几乎为0。

一般而言,在碳纤维增强树脂基复合材料的吸湿过程中,碳纤维材料并不会受到湿热环境的影响。因此在吸湿过程中,纤维和基体之间将会产生膨胀失配现象,进而导致材料内部产生残余应力。考虑到复合材料的吸湿膨胀现象,以吸湿分析得到的吸湿量作为边界条件,计算试样由于吸湿引起的残余应力分布规律。分析模型仍采用吸湿分析的有限元网格,单层板的湿胀系数为^[17]: $\beta_1 = 0, \beta_2 = \beta_3 = 0.6 \times 10^{-6}$ 。图7为经344 h和5500 h吸湿后中间90°铺层吸湿残余应力分布云图。可以看出,吸湿残余应力水平均在 10^{-5} 级,吸湿残余应力很小。观察试样中各铺层中其他吸湿残余应力分量发现,试样吸湿344 h后,各个应力分量级别均在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ MPa,当试样达到饱和吸湿(吸湿5500 h)时,各个应力分量级别均在 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ MPa。吸湿后残余应力数值均很小,并不足以引起试样的破坏。饱和吸湿时应力分量值比吸湿344 h时均小,主要是由于接近饱和吸湿时的试样内部几乎没有水分浓度梯度。

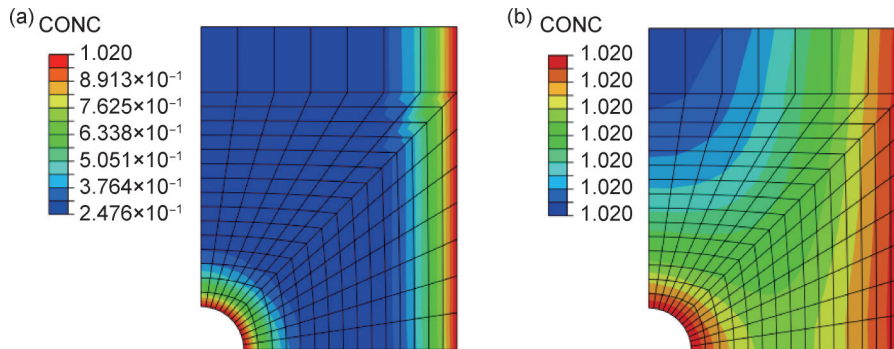


图6 OHC试样内部吸湿浓度分布云图

(a)吸湿344 h;(b)吸湿5500 h

Fig.6 Concentration distribution cloud maps inside OHC sample after moisture absorption

(a)hygrothermal aging for 344 h;(b)hygrothermal aging for 5500 h

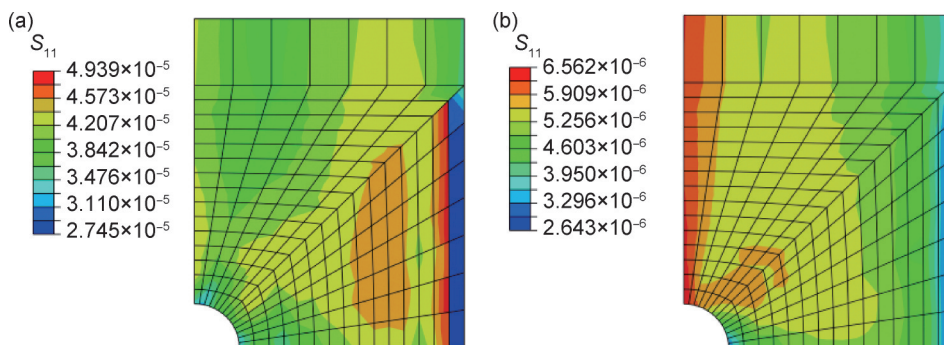


图7 吸湿残余应力分布云图 (a)吸湿344 h;(b)吸湿5500 h

Fig.7 Cloud maps of residual stress distribution after moisture absorption (a)hygrothermal aging for 344 h;(b)hygrothermal aging for 5500 h

2.5 开孔压缩模拟结果分析

图8为有限元计算的未吸湿、344 h吸湿及饱和吸

湿后开孔压缩测试的载荷-位移曲线。可以看出,随着吸湿时间的延长,材料的吸湿量随之增加,湿热效应

对材料性能的影响也逐渐增大,导致材料的承载能力降低,刚度也出现轻微下降的趋势。

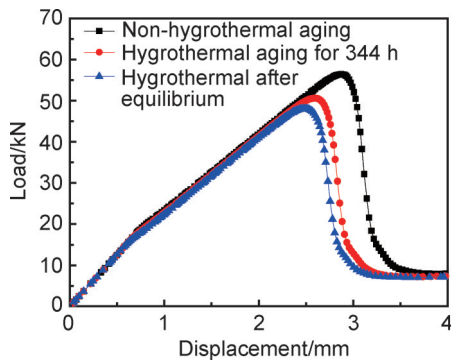


图 8 FEM 得到的不同情况下的载荷-位移曲线

Fig.8 Load-displacement curves under different conditions by FEM

在室温未吸湿环境下,实验得到的开孔压缩破坏载荷均值为 56.93 kN, FEM 计算得到的载荷为 56.43 kN, 两者相差 0.5 kN, 相对误差仅为 0.88%。经过 344 h 湿热处理后,实验得到的开孔压缩最大载荷为 53.97 kN, 相比室温下降 5.20%。在进行 FEM 模拟计算时,一种工况考虑了湿热残余应力,另一种工况未考虑湿热残

余应力的影响,经过计算发现,两种工况下的破坏载荷均为 50.62 kN,说明湿热残余应力对 FEM 模拟结果基本无影响,模拟得到的实验结果印证了湿热残余应力较小或无影响,说明对于吸湿膨胀系数小的材料,分析材料的失效时可以不考虑吸湿残余应力的影响。

对比湿热后的开孔压缩实验破坏载荷和 FEM 模拟结果发现,两者相差 3.35 kN, 相对误差为 6.21%。与室温环境下 FEM 与实验破坏载荷的相对误差相比,湿热后的相对误差明显较大,误差增加可能来自模拟计算过程中仅考虑湿热效应与材料性能呈线性下降的关系有关,而实际上湿热与材料性能二者之间的关系相对复杂。

有限元计算中使用状态变量 (solution dependent variables, SDV) 表示损伤情况。SDV1 表示纤维的损伤状态,当状态变量等于 1 时,表示开始出现损伤。图 9 为达到最大载荷时试样内 0° 铺层中的纤维损伤情况,从左到右分别表示未吸湿、吸湿 344 h 和吸湿 5500 h 的纤维损伤状态。可以看出,三种情况下损伤都是最先出现在孔边,且损伤基本沿垂直于加载方向分布。另外,经 5500 h 吸湿后的损伤程度更为严重些。

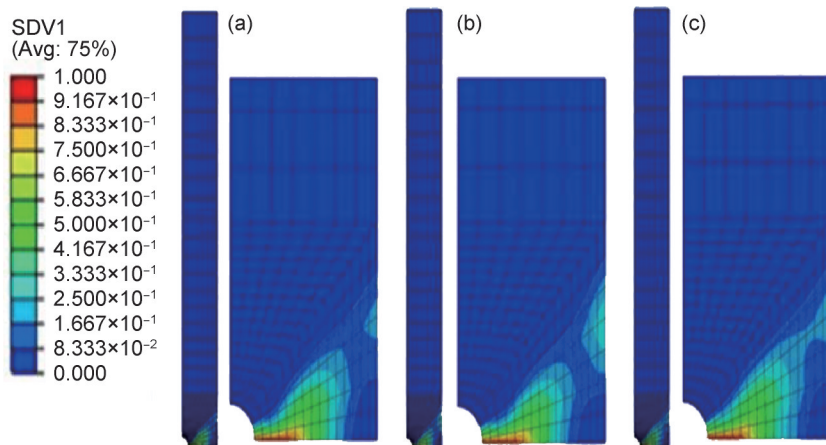


图 9 三种工况下最大载荷时 0° 纤维损伤分布状态 (a)未吸湿;(b)吸湿 344 h;(c)吸湿 5500 h

Fig.9 Damage distribution state of 0° fiber at maximum load under three conditions

(a)non-hygrothermal aging;(b)hygrothermal aging for 344 h;(c)hygrothermal aging for 5500 h

根据质量扩散模拟结果可以计算得到吸湿过程中最大载荷和载荷下降的变化情况,如图 10 所示。随着吸湿时间的增加,最大载荷快速下降。当吸湿进行到一定时间后,最大载荷的下降程度逐渐减小,最终趋于一个极限值。其原因在于,在吸湿初期,材料的吸湿量增加较快,因湿热环境导致材料性能下降程度较大。随着吸湿时间的逐渐增加,材料进入平衡吸湿阶段,此时材料性能的下落逐渐趋于稳定,即材料载荷下降也达到一个极限值。

3 结论

(1) T700/BP9916 复合材料的吸湿过程表现出典型的菲克扩散行为,湿热后刚度略有下降,开孔压缩最大载荷下降约 5.2%。

(2) 建立的湿热模型能够很好地预测 T700/BP9916 复合材料的吸湿行为,湿热后吸湿膨胀引起的内部残余应力较小,对开孔压缩实验结果无影响。

(3) 基于性能线性下降的开孔压缩数值模型能够

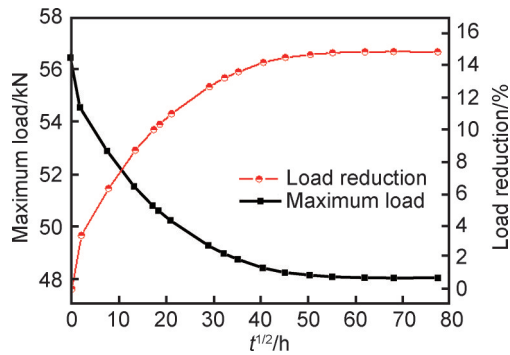


图10 最大压缩载荷随湿热时间的变化趋势

Fig.10 Variation trend of maximum compressive load with hydrothermal time

很好地预测 T700/BP9916 复合材料开孔压缩破坏载荷,数值模拟结果与实验结果吻合较好。

参考文献

- [1] Department of Defense and the Federal Aviation. Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials [M]. Pennsylvania: MIL-HDBK-17 Secretariat, 2002.
- [2] 李刚. CF/EP 复合材料湿热残余应力的有限元计算及 Raman 光谱表征[D]. 天津:天津大学, 2007.
LI G. Study on hygrothermal residual stress of carbon fiber/epoxy resin composites with finite element analysis and micro-Raman spectroscopy characterization[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [3] 苏震宇, 黄峰, 刘强. 先进复合材料非热压罐成型低成本技术研究进展[J]. 高科技纤维与应用, 2021, 46(1): 18-27.
SU Z Y, HUANG F, LIU Q. Development of low cost out-of-autoclave molding technology for advanced composite materials [J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2021, 46(1): 18-27.
- [4] VADDADI P, NAKAMURA T, SINGH R P. Transient hygrothermal stresses in fiber reinforced composites: a heterogeneous characterization approach[J]. Composites: Part A, 2003(34): 719-730.
- [5] MORII T, YOKOYAMA A, HAMADA H. Damage mechanics modeling and analysis for a hydrothermally aged composite [J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1998, 11: 170-184.
- [6] MERCIER J, BUNSELL A, CASTAING P, et al. Characterisation and modeling of aging of composites[J]. Composites: Part A, 2008(39): 428-438.
- [7] 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 Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(3): 1353-1362.
- [8] 周松, 贾耀雄, 许良, 等. 湿热环境对 T800 碳纤维/环氧树脂基复合材料力学性能的影响[J]. 材料工程, 2021, 49(10): 138-143.
ZHOU S, JIA Y X, XU L, et al. Effect of hygrothermal environ-
- ment on mechanical properties of T800 carbon fiber/epoxy resin composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(10): 138-143.
- [9] 冯振宇, 马骢瑶, 霍雨佳, 等. 湿热环境对 CFRP 层板压缩性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(8): 48-54.
FENG Z Y, MA C Y, HUO Y J, et al. Hygrothermal effects on compression property of CFRP laminates [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2018, 34(8): 48-54.
- [10] 贾少澎, 纪乾, 秦嘉徐, 等. 湿热环境对 CFRP 层板力学性能影响预测[J]. 现代塑料加工应用, 2018, 30(5): 23-27.
JIA S P, JI Q, QIN J X, et al. Prediction of influence of hygrothermal environment on mechanical properties of CFRP laminates [J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2018, 30(5): 23-27.
- [11] 闫伟, 燕瑛, 苏玲. 湿-热-力耦合环境下复合材料结构损伤分析与性能研究[J]. 复合材料学报, 2010, 27(2): 113-116.
YAN W, YAN Y, SU L. Damage analysis and strength prediction of composites structures in hygrothermal environment [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(2): 113-116.
- [12] IMAZ J J, RODRIGUEZ J L, RUBIO A, et al. Hydrothermal environment influence on water diffusion and mechanical behavior of carbon fibre/epoxy laminates[J]. Journal of Materials Science Letters, 1991, 10(11): 662-665.
- [13] 郑路, 常新龙, 赵锋, 等. 湿热环境中复合材料吸湿性研究[J]. 纤维复合材料, 2007(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(2): 37-39.
- [14] SHEN C H, SPRINGER G S. Moisture absorption and desorption of composite materials [J]. Journal of Composite Materials, 1976, 10(1): 2-20.
- [15] CAO S, WANG B, JIAO G Q. Influence of hydrothermal environment on the mechanical behavior of fiber reinforced polymers: characterization and modeling [C]// The 18th International Conference on Composite Materials. Jeju Island, 2011.
- [16] 航空航天工业部科学技术研究院. 复合材料设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1990: 444-448.
Science and Technology Research Institute of the Ministry of Aerospace Industry. Composite material design handbook [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1990: 444-448.
- [17] 沈观林, 胡更开, 刘彬. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 129-130.
SHEN G L, HU G K, LIU B. Mechanics of composite materials [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 129-130.

收稿日期: 2023-03-14; 录用日期: 2024-01-14

通讯作者: 王波(1976—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为先进复合材料力学行为, 联系地址: 陕西省西安市西北工业大学航空楼 A921 (710072), E-mail: b.wang@nwpu.edu.cn

(本文责编: 王 晶)