

文章编号:1674-8190(2019)01-062-11

# 湿热环境下复合材料层合板本构模型研究及其应用

谢伟, 窦鹏鹏, 薛展

(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

**摘要:** 近年来复合材料被广泛地应用于航空航天等工程领域。在实际的使用中, 复合材料在不同的湿热环境下其力学性能会发生显著变化, 针对这一问题, 国内外已有大量的试验研究, 而对湿热环境下复合材料的本构模型理论的研究则较少。在经典层合板理论上引入湿热膨胀系数的概念, 通过定义一个无量纲的温度, 建立材料弹性常数与湿热参数之间的函数关系, 推导出复合材料单层板在湿热力耦合作用下的本构关系, 同时加入三维 Hashin 失效判定准则对层合板的损伤演化及失效模式进行模拟。结果表明: 该模型较好地预测了复合材料层合板在不同湿热环境下的弹性响应, 为分析实际工程中复合材料结构模型在湿热环境下的力学行为提供了重要参考。

**关键词:** 复合材料; 本构模型; 湿热环境; Hashin 失效判定准则

**中图分类号:** O343.1; V214.8 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.01.008

## Research and Application of the Constitutive Model of Composite Laminates in Hydrothermal Environments

Xie Wei, Dou Pengpeng, Xue Zhan

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In recent years, composite materials have been widely used in aerospace and other engineering fields. In actual use, the mechanical properties of composites will change significantly in different hydrothermal environments. There have been a large number of experimental studies at home and abroad in response to this problem, while less research has been conducted on the constitutive model theory of composites in different hydrothermal environments. The study of the thermal properties of composite materials is adopted to introduce the concept of hygroscopic expansion coefficient and thermal expansion coefficient on the basis of classical laminated plate theory. The functional relationship between the elastic constants and the thermal parameters of the materials is established through the definition of a dimensionless temperature, deriving the constitutive equations of the single layer of composite material under the coupling of moisture and heat. Meanwhile, the 3D Hashin failure criteria is used to simulate the damage evolution and failure mode of the composite laminates. The results show that the model can predict the elastic response of composite laminates in different moist and thermal environments, which provides an important reference for analyzing the mechanical behavior of composite material structure in hydrothermal environments.

**Key words:** composite; constitutive model; hydrothermal environments; Hashin failure criteria

收稿日期: 2018-03-18; 修回日期: 2018-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(11672238); 中央高校基本科研业务费(3102017HQZZ002); 民用飞机预研项目(MIZ-2015-F-014)

通信作者: 窦鹏鹏, doupengpeng@sina.cn

引用格式: 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 Wei, Dou Pengpeng, Xue Zhan. 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. (in Chinese)

## 0 引 言

纤维增强复合材料具有许多优点,被广泛应用于航空、航天等各个工程领域。但是其在使用过程中会不可避免地承受温度变化、湿度变化及外部载荷的耦合作用,影响复合材料整体结构的力学性能。

从 20 世纪 70 年代开始,国内外对湿热环境下复合材料力学性能进行了大量的试验研究,C. H. Shen 等<sup>[1]</sup>给出了 T300/1034 层合板在温度范围  $-73\sim 177\text{ }^{\circ}\text{C}$  和相对湿度  $0\sim 100\%$  范围内的拉伸力学性能,并总结了几种材料体系层合板在湿热环境下的性能变化;包建文等<sup>[2]</sup>对国内生产的 T300/5284 复合材料在  $96\sim 98\text{ }^{\circ}\text{C}$  的蒸馏水中浸泡 60 h,研究发现,碳纤维基本不吸湿,而基体材料的吸湿效果较明显;D. Scida 等<sup>[3]</sup>对在  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  下吸湿 1 300 h 后的玻璃纤维/R1 二维编制层合板的性能进行试验研究后发现材料的拉伸强度、弯曲强度平均下降 53%;J. S. Earl 等<sup>[4]</sup>和 B. Guo 等<sup>[5]</sup>分别通过湿热耦合实验,研究了不同复合材料夹层板的各项力学性能随湿热环境因素的变化情况,但没有建立湿热本构方程等理论,也没有考虑损伤的影响;B. Abdel-Magid 等<sup>[6]</sup>的研究发现预加拉伸载荷下玻璃纤维增强复合材料试样吸湿后拉伸强度稍有增加,模量下降,破坏应变增加;李敏等<sup>[7]</sup>对 T700/5428 复合材料的吸湿过程和湿热老化后材料的弯曲性能和层间剪切性能进行了试验研究,结果表明湿度对材料的抗弯性能和层间剪切性能有比较明显的影响;J. P. Won 等<sup>[8]</sup>的研究结果表明湿热老化会导致复合材料的内部孔隙增多,拉伸强度下降;G. M. Candido 等<sup>[9]</sup>对环氧树脂基复合材料进行湿热老化后,研究了其力学性能;余治国等<sup>[10]</sup>通过对 T700/环氧树脂及 T300/环氧树脂复合材料进行研究,并且对材料老化前后进行了力学性能的检测,试验研究认为,复合材料的吸湿过程是一个缓慢的过程,在湿热环境下,碳纤维/环氧树脂基复合材料的压缩强度会有所下降,保持率均在 80% 左右;J. Mohan 等<sup>[11]</sup>的研究发现,吸湿对复合材料层合板的断裂韧性有很大的影响,I 型断裂韧性下

降 20%, II 型断裂韧性下降 50%。

在理论研究方面,K. H. Amara 等<sup>[12]</sup>系统地研究了湿热老化正交层合板由于基体横向开裂而引起的纵向弹性模量与泊松比的变化,使用两种改进的剪切滞后模型来估计复合材料层合板由于横向开裂所引起的刚度退化;C. K. Kundu 等<sup>[13]</sup>分析了复合材料层合板壳结构在湿热条件下的非线性屈曲变形,但其计算方法只适用于薄壳结构;闫伟等<sup>[14]</sup>和刘玉佳等<sup>[15]</sup>建立了湿热力三者耦合的渐进损伤模型,仿真了复合材料层合板在不同湿热条件下的损伤起始及损伤演化全过程,并分析湿热环境对其拉伸、压缩强度的影响;A. Lal 等<sup>[16]</sup>利用细观力学的模型评估复合材料在湿热环境下的力学性能,通过对树脂性能乘以系数  $F_m$  进行衰减处理,从而推得退化后的湿热本构方程,该方法只考虑了湿热对树脂性能的影响,对纤维性能的影响略去不计;R. Kumar 等<sup>[17]</sup>则认为湿热环境下复合材料层合板的弹性参数和湿热膨胀系数与温度和湿浓度的变化量存在线性的关系,泊松比受温度和湿度的影响很小,视为不变;Krzysztof Dems 等<sup>[18]</sup>考虑到纤维的截面形状对复合材料层合板的宏观热传导系数的影响时,采用二维模型计算得到了层合板在热载作用下的热传递和热分布,为研究复合材料受热载时的力学行为奠定基础;韩坤华等<sup>[19]</sup>建立了复合材料双面贴补修理的力学模型,并进行了湿扩散—应力的耦合分析。

综上所述,国内外对该问题的研究目前还没有形成统一的分析与评定方法,而且多数是以试验分析为主,理论方面的研究较少。为了进一步了解复合材料结构在服役期间受湿热环境的影响,需综合考虑载荷和湿热环境变化的作用,开展复合材料在湿热环境下的弹性响应研究,对复合材料的结构设计、制造、使用、维护和寿命预测以及新材料的开发研究方面都具有重要的工程意义。因此,本文首先研究湿热环境下复合材料层合板的渐进损伤模型;然后利用有限元分析软件 Abaqus 的二次开发接口编写了自定义材料子程序,并预测湿热环境开孔复合材料层合板在拉伸和压缩载荷下的破坏强度和失效模式,验证本文所建立模型的有效性;最后基于该模型提出一种实际工程测量中分离载荷应

变与环境应变的方法。

## 1 湿热环境下复合材料层合板弹性响应预测模型

### 1.1 正交各项异性复合材料单层板的湿热效应

通过对正交各向异性材料三个材料主方向的单向拉伸试验和三个与材料主方向垂直的平面内的纯剪切试验,得到用工程弹性常数表示的正交各向异性材料的应力-应变关系:

$$\sigma_i = Q_{ij}\epsilon_j \quad (i, j=1, 2, \dots, 6) \quad (1)$$

式中:  $Q_{ij}$  为刚度矩阵中的各系数。

当温度由  $T_0$  变为  $T$  时,单层板材料主方向的热自由线应变为  $e_{11}^T$ 、 $e_{22}^T$  和  $e_{33}^T$ ,由于单层板在材料主方向具有正交各项异性,热剪切应变  $e_{23}^T = e_{31}^T = e_{12}^T = 0$ 。此处用符号  $e$  表示自由应变以区别于由力引起的应变(符号  $\epsilon$ )。令  $\Delta T = T - T_0$ ,  $T_0$  为初始状态温度,由热膨胀系数的定义,得到单层板材料主方向的热膨胀系数为

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{e_{11}^T}{\Delta T} \\ \alpha_2 = \frac{e_{22}^T}{\Delta T} \\ \alpha_3 = \frac{e_{33}^T}{\Delta T} \end{cases} \quad (2)$$

热膨胀系数的单位是  $1/^\circ\text{C}$  或  $1/\text{K}$ ( $\text{K}$  是绝对温度的单位)

由式(2)可得单层板材料主方向热自由应变为

$$\begin{cases} e_{11}^T \\ e_{22}^T \\ e_{33}^T \\ e_{23}^T \\ e_{31}^T \\ e_{12}^T \end{cases} = \begin{cases} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases} \Delta T \quad (3)$$

单层板吸入水分后质量的和干燥状态下的质量比称为单层板的吸湿量,用符号  $C$  表示

$$C = \frac{\Delta m}{m} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $m$  为单层板干燥状态的质量;  $\Delta m$  为吸湿后的质量增量。

参照单层板材料主方向热膨胀系数和热自由应变的定义方法,单层板材料主方向的湿自由应变为

$$\begin{cases} e_{11}^H \\ e_{22}^H \\ e_{33}^H \\ e_{23}^H \\ e_{31}^H \\ e_{12}^H \end{cases} = \begin{cases} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases} C \quad (5)$$

式中:  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  和  $\beta_3$  为单层板材料主方向的湿膨胀系数。

单层板材料主方向湿热自由应变为

$$\begin{cases} e_{11} \\ e_{22} \\ e_{33} \\ e_{23} \\ e_{31} \\ e_{12} \end{cases} = \begin{cases} e_{11}^T \\ e_{22}^T \\ e_{33}^T \\ e_{23}^T \\ e_{31}^T \\ e_{12}^T \end{cases} + \begin{cases} e_{11}^H \\ e_{22}^H \\ e_{33}^H \\ e_{23}^H \\ e_{31}^H \\ e_{12}^H \end{cases} \quad (6)$$

由叠加原理,总应变为力引起的应变和湿热自由应变之和,即

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon^M\} + \{e\} \quad (7)$$

式中:  $\{\epsilon\}$  为总应变向量;  $\{\epsilon^M\}$  为用力引起的应变向量;  $\{e\}$  为湿热自由应变。

因此,在外加载荷和湿热的联合作用下,单层板在材料主方向的本构关系为

$$\{\epsilon\} = \mathbf{S}\{\sigma\} + \{e\} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{S}$  为单层板的柔度矩阵。

所以有

$$\{\sigma\} = \mathbf{Q}\{\epsilon - e\} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{Q}$  为单层板的刚度矩阵。

即考虑湿热变形情况下正交各向异性材料的本构模型为

$$\sigma_i = Q_{ij}(\epsilon_j - \alpha\Delta T - \beta C) \quad (i, j=1, 2, \dots, 6) \quad (10)$$

### 1.2 湿热环境下组分材料性能的退化模型

在湿热环境下,复合材料单层板除了受湿热自由膨胀影响外,其组分材料的弹性模量和强度等性能也会因环境的影响而变化。本文引入 M. Tsai 提出的无量纲温度  $T^*$  [20], 其表达式如下:

$$T^* = \frac{T_g - T_{opr}}{T_g^0 - T_{rm}} \quad (11)$$

$$T_g = T_g^0 - kC \quad (12)$$

式中:  $T_{opr}$  为试验温度;  $T_g^0$  为室温干态下材料的玻璃化转变温度;  $T_g$  为湿热环境下材料的玻璃化转变温度;  $T_{rm}$  为室温;  $C$  为复合材料吸水浓度。

那么, 湿热环境对纤维和基体性能的影响可以用  $T^*$  的幂函数来近似表达, 表达式如下:

$$\begin{cases} E_m = E_m^0 (T^*)^a \\ G_m = G_m^0 (T^*)^b \\ E_{f11} = E_{f11}^0 (T^*)^c \\ E_{f22} = E_{f22}^0 (T^*)^d \\ G_f = G_f^0 (T^*)^e \end{cases} \quad (13)$$

湿热环境对单向板强度性能的影响也可以用  $T^*$  的幂函数来近似表达, 湿热退化表达式如下:

$$\begin{cases} \frac{X_t}{X_t^0} = (T^*)^f \\ \frac{X_c}{X_c^0} = \left(\frac{G_{12}}{G_{12}^0}\right)^{61C} (T^*)^g \\ \frac{Y_t}{Y_t^0} = (T^*)^h \\ \frac{Y_c}{Y_c^0} = \left(\frac{G_{12}}{G_{12}^0}\right)^{61C} (T^*)^i \\ \frac{S_{12}}{S_{12}^0} = (T^*)^j \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $X_t$ 、 $X_c$  分别为单向板纵向拉伸、压缩强度;  $Y_t$ 、 $Y_c$  分别为单向板横向拉伸、压缩强度;  $S$  为单向板剪切强度;  $a \sim j$  为材料湿热退化常数, 可通过复合材料手册中常温下和 130 °C 下的材料性能常数计算得到, 上标 0 表示室温干态下的材料性能。

为了根据组分材料的力学性能推导出单层板的力学性能, 本文采用掺混率法<sup>[21]</sup>。掺混率法是一种根据纤维和基体的体积分数来计算计算单层板的湿热膨胀系数、弹性模量、剪切模量以及泊松比等参数的方法, 公式如下:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_f E_{f11} V_f + \alpha_m E_m V_m}{E_{f11} V_f + E_m V_m} \quad (15)$$

$$\alpha_2 = V_f (1 + \nu_f) \alpha_f + V_m (1 + \nu_m) \alpha_m - (V_f \nu_f + V_m \nu_m) \alpha_1 \quad (16)$$

$$\beta_1 = \frac{E_m \beta_m}{E_{f11} V_f + E_m V_m} \times \frac{\rho}{\rho_m} \quad (17)$$

$$\beta_2 = (1 + \nu_f) \beta_m \frac{\rho}{\rho_m} - (V_f \nu_f + V_m \nu_m) \beta_1 \quad (18)$$

$$E_{11} = E_{f11} V_f + E_m V_m \quad (19)$$

$$E_{22} = \frac{1 + 0.2926 \left(\frac{V_m}{V_f}\right)}{\frac{1}{E_{f22}} + \frac{0.2926 \left(\frac{V_m}{V_f}\right)}{E_m}} \quad (20)$$

$$G_{12} = \frac{1 + 0.4147 \left(\frac{V_m}{V_f}\right)}{\frac{1}{G_f} + \frac{0.4147 \left(\frac{V_m}{V_f}\right)}{G_m}} \quad (21)$$

$$\nu_{12} = V_f \nu_f + V_m \nu_m \quad (22)$$

式中:  $\alpha$  为单层材料的热膨胀系数;  $\beta$  为单层板材料的湿膨胀系数;  $E$  为单向板弹性模量;  $G$  为单向板剪切模量;  $\nu$  为单向板的泊松比; 下标 m 表示基体性能, 下标 f 表示纤维性能。

### 1.3 基于三维 Hashin 的失效判定准则

复合材料层合板在外载作用下有多种失效模式, 包括纤维拉伸失效、纤维压缩失效、基体拉伸失效、基体压缩失效、纤维—基体剪切失效、分层失效和各类组合失效。在加载阶段, 层合板中各类失效模式逐渐累积, 导致层合板承载能力下降, 最终失去承载能力, 为了模拟层合板的渐进损伤失效过程, 本文采用基于 Hashin 准则发展得到的三维失效准则<sup>[22-23]</sup>对单元进行失效判断。

纤维拉伸失效:

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (\sigma_1 > 0) \quad (23)$$

纤维压缩失效:

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 \geq 1 \quad (\sigma_{11} \leq 0) \quad (24)$$

基体拉伸失效:

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (\sigma_1 > 0) \quad (25)$$

基体压缩失效:

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (\sigma_1 \leq 0) \quad (26)$$

基体—纤维剪切失效:

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (\sigma_1 < 0) \quad (27)$$

分层失效:

$$\left(\frac{\sigma_3}{Z_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (\sigma_3 > 0) \quad (28)$$

$$\left(\frac{\sigma_3}{Z_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (\sigma_3 \leq 0) \quad (29)$$

式中:  $Z_t$ 、 $Z_c$  分别为单向板法向拉伸、压缩强度。在湿热环境下,上述判定准则中的强度采用湿热退化后的值。

刚度退化后复合材料单层板的本构方程表示为

$$\sigma_i = \bar{Q}_{ij}(\epsilon_j - \alpha\Delta T - \beta C) \quad (i, j = 1, 2, \dots, 6) \quad (30)$$

式中:  $\bar{Q}_{ij}$  为湿热退化及刚度退化后的刚度矩阵;  $\bar{\alpha}$  和  $\bar{\beta}$  为湿热退化后的各项热湿膨胀系数。

至此,本文建立了一套完整的湿热环境下复合材料单层板弹性响应的理论模型。需要说明的是,上述公式是基于单层板的,在实际仿真中通过几何上的切割分层模拟不同角度的铺层可以有效地模拟多向铺层层合板。对于各层间的湿热变形的相互作用本文是忽略的,是对模型的一种简化。

## 1.4 Vumat 子程序流程

基于以上理论,本文利用 Abaqus 提供的子程序接口 Vumat 编写用于计算湿热环境下复合材料层合板弹性响应的程序,其流程如图 1 所示。

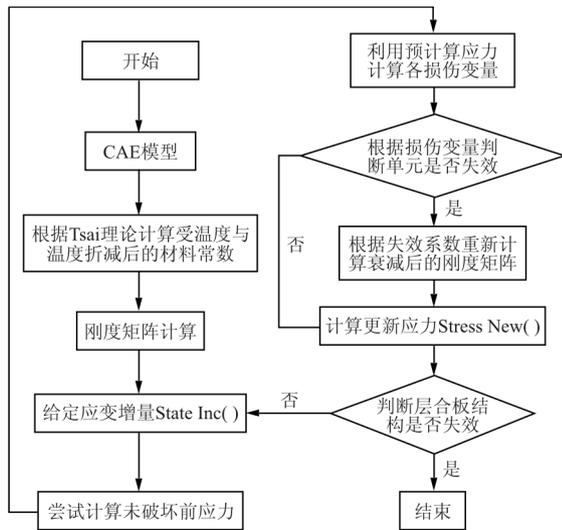


图 1 程序流程图

Fig. 1 Program flow chart

## 2 复合材料开孔层合板破坏极限及破坏模式的预测

### 2.1 开孔层合板试验

试验件结构和几何构型如图 2 所示,该材料单层厚度为 0.115 mm。开孔拉伸试验件的铺层顺

序为  $[45/-45/0/90/0/90/45/-45/0/90]_s$ , 层数为 20 层,总厚度为 2.3 mm。开孔压缩试验件的铺层顺序为  $[45/-45/0/90/0/90/45/-45/0/90]_{25}$ , 层数为 40 层,总厚度为 4.6 mm。试验件长 300 mm,宽 36 mm,孔径 6 mm,具体几何尺寸如表 1 所示。

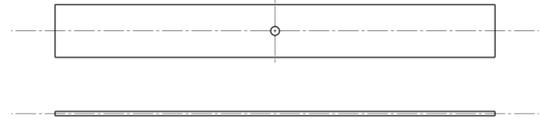


图 2 开孔试验件几何构型示意图

Fig. 2 Geometric configuration of the open-hole test piece

表 1 开孔试验件几何尺寸

Table 1 Geometry size of the open-hole test piece

单位:mm

试验件	厚度	长度	宽度	直径
开孔拉伸件	2.3	300	36	6
开孔压缩件	4.6	300	36	6

#### (1) 拉伸试验

开孔拉伸试验有室温干态(25 °C - 0%RH)和干冷(-55 °C - 0%RH)两种试验环境。使用 DDL-100 电子万能试验机系统进行加载,如图 3 所示。进行破坏试验时,先把载荷、位移、变形调为 0,以 2 mm/min 的速度加载,直至试件破断,记录载荷-位移曲线、载荷-变形(应变)曲线。按照 ASTM D5766 规定的代码记录试验件破坏模式。



(a) 室温干态环境

(b) 干冷环境

图 3 层合板开孔拉伸试验

Fig. 3 Tensile test of laminates

室温干态和干冷环境下开孔拉伸试验件的破坏模式如图 4 所示,可以看出:其断口出现了较为明显的纤维拉断、基体拉断和分层混合破坏模式,而且两种环境下开孔拉伸试验件的破坏模式基本一致。



(a) 室温干态环境 (b) 干冷环境

图 4 开孔拉伸破坏模式  
Fig. 4 Tensile failure mode

(2) 压缩试验

开孔压缩试验有室温干态(25 °C-0%RH)和湿热(70 °C-85%RH)两种试验环境。湿热试验件在试验之前放入温度为 70 °C 湿度为 85% 的恒温恒湿箱中进行吸湿处理,试验件经过 89 天的吸湿后最终的平均饱和吸湿率为 0.6%。

进行破坏试验时,以 2 mm/min 速率将载荷施加到试件上,记录载荷-位移数据。如果试件破坏,记录最大载荷、破坏载荷以及尽可能接近断裂瞬间的夹头位移,按照 ASTM D6484 规定的代码记录破坏模式。

室温干态和湿热环境下开孔压缩试验件的破坏模式如图 5 所示,可以看出:其断口出现了较为明显的纤维压缩断、基体压缩和分层混合破坏模式,而且两种环境下开孔拉伸试验件的破坏模式基本一致。



(a) 室温干态环境 (b) 湿热环境

图 5 开孔压缩破坏模式  
Fig. 5 Compression failure mode

2.2 有限元模型

按照试件尺寸建立相应的有限元模型,如图 6 所示。采用 C3D8R 减缩积分六面体实体单元进行网格划分。边界条件为一段固支,一段通过参考点施加位移载荷,同时调用 Vumat 子程序进行计算,

模拟湿热环境。

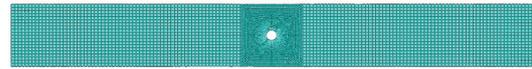


图 6 试验件有限元模型  
Fig. 6 Finite element model of test piece

CF3031/BA9916-II 复合材料的工程弹性常数、材料强度属性如表 2 和表 3 所示。材料在湿热环境下性能退化常数如表 4 所示。

表 2 室温干态下 CF3031/BA9916-II 材料组分材料性能参数

Table 2 Material properties of component materials of CF3031/BA9916-II

参数	数值	参数	数值
$E_{11}^0/\text{GPa}$	230	$G_m^0/\text{GPa}$	1.23
$E_{11}^0/\text{GPa}$	15	$\mu_m$	0.4
$G_f^0/\text{GPa}$	15	$\alpha_f/(10^{-6}\text{gK}^{-1})$	-0.41
$\mu_f$	0.2	$\alpha_m/(10^{-6}\text{gK}^{-1})$	83
$V_m$	0.4	$\beta_m/(10^{-6}\text{g}\%)$	0.6
$E_m^0/\text{GPa}$	3.45	$\rho_m/(\text{ggcm}^{-3})$	1.25

表 3 室温干态下 CF3031/BA9916-II 材料单向带性能参数  
Table 3 Properties of lamina of CF3031/BA9916-II

参数	数值	参数	数值
$X_t^0/\text{MPa}$	1 787	$S_{12}^0/\text{MPa}$	135
$X_c^0/\text{MPa}$	1 280	$T_g/^\circ\text{C}$	210
$Y_t^0/\text{MPa}$	76	$\rho/(\text{ggcm}^{-3})$	1.5
$Y_c^0/\text{MPa}$	200	$C/\%$	0.6

表 4 湿热退化常数

Table 4 Hygrothermal degradation parameters

常数	数值	常数	数值
$a$	0.32	$g$	0.11
$b$	0.44	$h$	0.69
$c$	0.016	$i$	0.25
$d$	0.085	$j$	0.318
$e$	0.1	$k$	4 800
$f$	0.03		

2.3 极限强度预测

基于本文的方法对上述开孔试验件在不同温度及湿度环境下的弹性响应进行模拟。拉伸载荷作用下有限元预测结果与试验结果的对比如表 5

所示,压缩载荷作用下有限元预测结果与试验结果的对比如表 6 所示,可以看出:对于拉伸强度和压缩强度有限元预测结果与 2.1 节的试验结果吻合较好。有限元仿真计算得到的拉伸和压缩载荷一位移曲线如图 7 所示。

表 5 拉伸强度仿真值与试验值对比

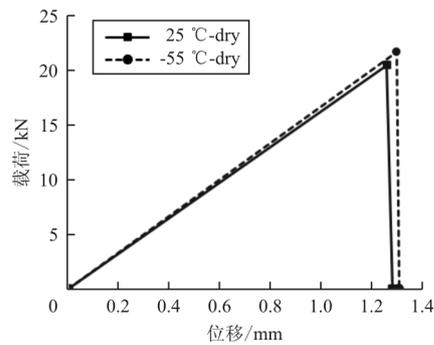
Table 5 Comparison of simulation value and test value of the tensile strength

环境	拉伸强度		
	试验值/MPa	仿真值/MPa	误差/%
25 °C-0%RH	298.93	314.39	5.17
-55 °C-0%RH	309.19	327.89	6.04

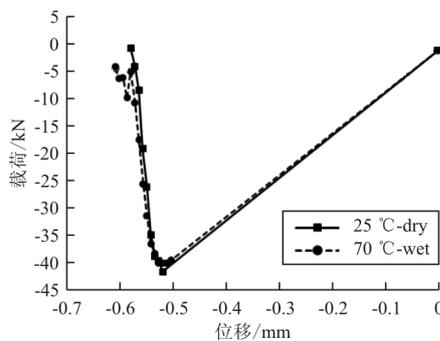
表 6 压缩强度仿真值与试验值对比

Table 6 Comparison of simulation value and test value of the compression strength

环境	压缩强度		
	试验值/MPa	仿真值/MPa	误差/%
25 °C-0%RH	333.15	319.28	4.16
70 °C-85%RH	267.42	279.12	4.37



(a) 拉伸



(b) 压缩

图 7 拉伸和压缩载荷一位移曲线

Fig. 7 Tensile and compression load-displacement curves

## 2.4 损伤扩展过程分析

以-55 °C,0%的吸湿量的干冷环境下的开孔拉伸试件为例说明层合板的损伤扩展全过程。为了便于观察孔边单元的损伤情况本文取孔边局部放大图,定义应变载荷 $\bar{\epsilon}$ =加载端位移/试件长度。当应变载荷达到 0.75%时,层合板的第 4、6、10、11、15、17 层分别出现基底拉伸失效,对应铺层角度都为 90°,如图 8(a)所示。随后当应变载荷达到 0.92%时,基底拉伸失效扩展到第 2(-45°)、7(45°)、14(45°)、19(-45°)层,如图 8(b)和 8(c)所示。当应变载荷达到 1.04%时,基底拉伸失效扩展到所有铺层,如图 8(d)所示,同时基底纤维剪切失效、分层失效与纤维拉伸失效瞬间贯穿整个截面,层合板最终失效,失效结果如图 9~图 10 所示。

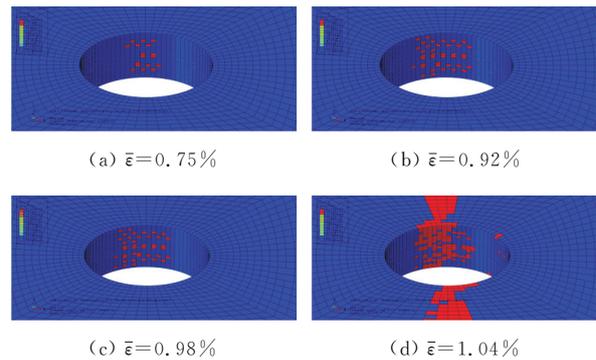


图 8 -55 °C干冷条件下开孔拉伸基底拉伸损伤扩展过程  
Fig. 8 Tensile damage propagation process of the matrix under dry and cold conditions

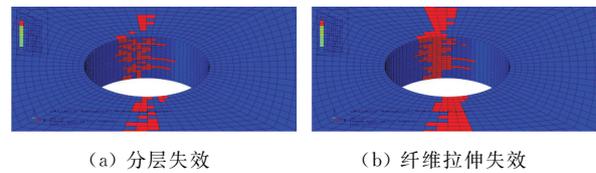


图 9  $\bar{\epsilon}=1.04\%$ 时的分层失效与纤维拉伸失效  
Fig. 9 Stratified failure and fiber tensile failure in  $\bar{\epsilon}=1.04\%$

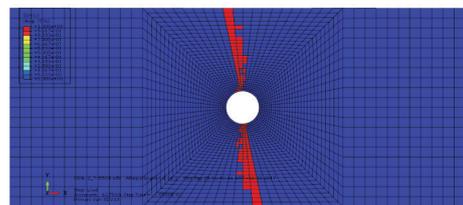


图 10 层合板失效时的纤维拉伸失效单元

Fig. 10 Fiber tensile failure unit when laminate fails

开孔拉伸试验件和开孔压缩试验件损伤萌生应变和初始损伤模式(如表 7 所示),开孔拉伸试验件和开孔压缩试验件失效应变和最终失效模式如表 8 所示。

表 7 损伤萌生应变和初始损伤模式

Table 7 Injury initiation strain and initial damage pattern

加载方式	环 境	应变载荷	失效模式
拉 伸	T25 °C-RH0%	0.63%	基体拉伸
	T-55 °C-RH0%	0.75%	基体拉伸
压 缩	T25 °C-RH0%	0.40%	基体压缩
			纤维压缩
	T70 °C-RH85%	0.33%	基体纤维
			剪切

表 8 失效应变和最终失效模式

Table 8 Failure strain and final failure mode

加载方式	环 境	应变载荷	失效模式
拉 伸	T25 °C-RH0%	0.98%	基体拉伸
			纤维拉伸
			基体纤维
压 缩	T-55 °C-RH0%	1.04%	剪切
			基体拉伸
			纤维拉伸
拉 伸	T25 °C-RH0%	0.52%	基体纤维
			剪切
			基体拉伸
压 缩	T70 °C-RH85%	0.42%	纤维拉伸
			基体纤维
			剪切

从表 7~表 8 可以看出:湿热环境与干冷环境对复合材料开孔层合板的失效模式影响不大。在拉伸载荷作用下,层合板萌生阶段的性能主要受环境影响较大的基体材料的影响,因此干冷状态下的萌生应变要明显大于室温干态下的萌生应变。当拉伸载荷持续增大,材料的性能主要由受环境影

响较小的纤维材料的影响,因此层合板失效时的应变受环境影响不大。在压缩载荷作用下,层合板的性能主要受基体材料的影响,所以在损伤萌生阶段和破坏阶段湿热环境下的应变较室温干态下的应变都有明显下降。

综上所述,本文建立的预测模型能够较好地计算不同湿热环境下、不同载荷类型下开孔复合材料层合板的极限强度及失效模式。

### 3 一种基于试验与有限元模拟结果的载荷应变与环境应变的分离方法

复合材料结构实际的使用环境通常存在较大的温度与湿度变化,结构既有由载荷引起的载荷应变,又有由环境作用带来的环境应变,导致其载荷测量难以实现。解决办法之一就是对其载荷应变和环境应变进行分离,本文基于以上的理论模型提出一种由实测应变得到载荷应变和环境应变的方法。

#### 3.1 各情况单独作用下的 11 向应变—应力响应

本文以 70 °C-85%RH 环境下开孔拉伸试验件有限元模拟结果为例分析在不同条件单独作用下层合板的应变响应,选取 11 向(试验加载方向)应变在 0~1 000 线弹性区间。三种不同组合下距离孔中心 50 mm 处的 11 向应变—应力关系如图 11 所示。当只考虑湿热影响时,层合板的变形就是因为温度变化和吸入水分引起的热膨胀和湿膨胀的自由变形,由此变形而引起的应力—应变称之为湿热自由应力应变。其应变—应力曲线如三角实线所示,可以看到当层合板的温度由 25 °C 上升至 70 °C 时,由湿热膨胀产生的纵向最大应变为 115,对应的最大应力为 8.1 MPa。当只考虑载荷作用时,即忽略湿热自由变形及湿热环境对组分材料性能的影响,其应变—应力曲线如方形虚线所示,当应变达到 1 070 时对应的应力为 152.9 MPa,可见由湿热自由膨胀引起的应力应变相对于由机械载荷产生的应力应变是很小的。当考虑湿热力共同作用时,其应变—应力曲线如圆形实线

所示,当应变达到  $1 \times 10^6$  时对应的应力为 136.6 MPa。

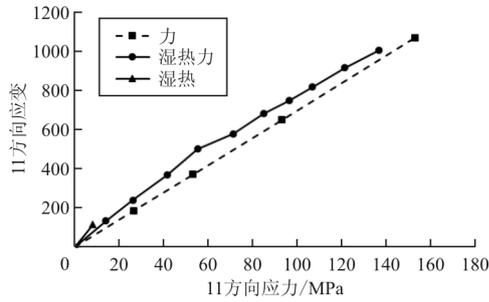


图 11 湿热力分别作用下的应变—应力曲线

Fig. 11 Strain-stress curves in hydrothermal environments

综上所述,由湿热自由膨胀引起的 11 向应变只有破坏应变的 3.4% (小于 5%),几乎可以忽略不计;湿热力作用下的应变—应力曲线的斜率要略大于载荷单独作用下应变—应力曲线的斜率,这是由于湿热环境使得组份材料(特别是基体材料)的性能下降,从而使层合板的总体刚度下降。

由于湿热应变分为湿热自由应变以及由湿热影响导致材料弹性模量等属性变化而带来的应变两部分,这里通过验证说明了湿热自由应变很小,可以忽略不计,但由湿热对材料弹性模量等属性带来的变化所造成的应变是不可忽略的。

### 3.2 载荷应变与环境应变的分离方法

对于一般的应变—应力曲线,如图 12 所示,湿热力作用下的应变—应力曲线可以表达为

$$\epsilon_{\text{MHT}} = k_{\text{MHT}}\sigma + e \quad (31)$$

式中: $k_{\text{MHT}}$ 为湿热力共同作用下测量点 11 向的应变—应力曲线的斜率; $\epsilon_{\text{MHT}}$ 为湿热力共同作用下的实测应变; $e$ 为湿热自由应变。

单独力作用下的应变—应力曲线可以表达为

$$\epsilon_{\text{M}} = k_{\text{M}}\sigma \quad (32)$$

式中: $k_{\text{M}}$ 为力作用下测量点 11 向的应变—应力曲线的斜率; $\epsilon_{\text{M}}$ 为力作用下的应变。

将式(31)代入式(32),得到载荷应变  $\epsilon_{\text{M}}$  的表达式为

$$\epsilon_{\text{M}} = k_{\text{M}} \frac{\epsilon_{\text{MHT}} - e}{k_{\text{MHT}}} \quad (33)$$

环境应变  $\epsilon_{\text{HT}}$  为

$$\epsilon_{\text{HT}} = \epsilon_{\text{MHT}} - \epsilon_{\text{M}} \quad (34)$$

当忽略湿热自由应变带来的影响时,式(33)可以简化为

$$\epsilon_{\text{M}} = k_{\text{M}} \frac{\epsilon_{\text{MHT}}}{k_{\text{MHT}}} \quad (35)$$

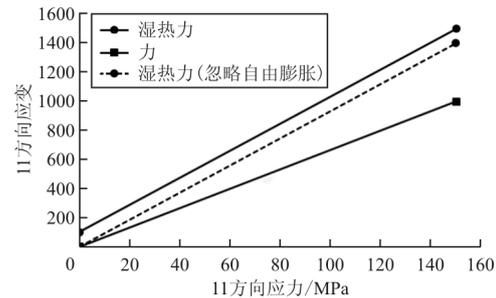


图 12 一般环境下各应变—应力曲线

Fig. 12 Stress-strain curve in normal environment

基于以上的理论提出一套根据实测应变和有限元模拟结果分离载荷应变和环境应变的方法。该方法主要分为以下两个步骤:

(1) 利用有限元软件分别计算得到单独力作用与湿热力共同作用下的应变—应力曲线,其斜率分别为  $k_{\text{M}}$  和  $k_{\text{MHT}}$ 。

(2) 根据实测应变  $\epsilon_{\text{MHT}}$  由式(35)和式(34)分别计算出该状态下对应的载荷应变  $\epsilon_{\text{M}}$  和环境应变  $\epsilon_{\text{HT}}$ 。

70 °C—85%RH 环境下的分离湿热应变曲线(三角实线)和载荷应变曲线(圆形虚线)如图 13 所示。

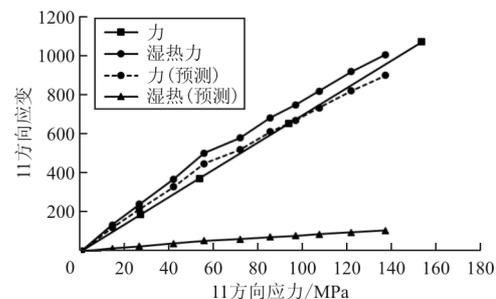


图 13 70 °C—85%RH 下应变分离曲线

Fig. 13 Strain separation curve in 70 °C—85%RH

从图 13 可以看出:载荷应变曲线与有限元预

测结果(方形实线)吻合较好,验证了该载荷应变分离方法的有效性。

## 4 结 论

(1) 本文建立了湿热环境下复合材料层合板本构模型,并利用该模型对开孔复合材料层合板在不同温度湿度和不同受载条件下的破坏极限及失效模式进行了预测,破坏极限的预测结果与试验误差均在 10% 以内,失效模式的预测结果与实验结果基本一致,表明该模型是有效的。

(2) 干冷环境对复合材料层合板的拉伸强度影响较小,  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  干冷环境下拉伸强度只比室温干态下提升 3.43%, 模型预测结果为 4.29%。湿热环境对开孔复合材料层合板的压缩强度影响较大,  $70\text{ }^{\circ}\text{C}-85\%\text{RH}$  环境下压缩强度比室温干态下降了 19.73%, 模型预测结果为 12.58%。

(3) 本文基于该预测模型提出了一种在实际工程测量中分离环境应变和载荷应变的方法,该方法步骤简单易于操作,分离结果较好,为进一步研究复合材料结构件在实际使用环境下载荷测量的湿热修正提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] Shen C H, Springer G S. Effects of moisture and temperature on the tensile strength of composite materials[J]. *Journal of Composite Materials*, 1977, 10(1): 661-666.
- [2] 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): 37-40.  
Bao Jianwen, Chen Xiangbao. Study on hygrothermal properties of 5284/T300 composites[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2000, 30(4): 37-40. (in Chinese)
- [3] Scida D, Aboura Z, Benzeggagh M L. The effect of ageing on the damage events in woven-fibre composite materials under different loading conditions[J]. *Composites Science & Technology*, 2002, 62(4): 551-557.
- [4] Earl J S, Dulieu-Barton J M, Sheno R A. Determination of hygrothermal ageing effects in sandwich construction joints using thermoelastic stress analysis[J]. *Composites Science & Technology*, 2003, 63(2): 211-223.
- [5] Guo B, Jia D, Fu W, et al. Hygrothermal stability of dicyanate-novolac epoxy resin blends[J]. *Polymer Degradation & Stability*, 2003, 79(3): 521-528.
- [6] Abdel-Magid B, Ziaee S, Gass K, et al. The combined effects of load, moisture and temperature on the properties of E-glass/epoxy composites[J]. *Composite Structures*, 2005, 71(3/4): 320-326.
- [7] 李敏, 张宝艳. 5428/T700 复合材料的耐湿热性能[J]. *纤维复合材料*, 2006, 23(1): 3-4.  
Li Min, Zhang Baoyan. Study on hydrothermal-resistant properties of 5428/T700 composite system[J]. *Fiber Composites*, 23(1): 3-4. (in Chinese)
- [8] Won J P, Lee S J, Kim Y J, et al. The effect of exposure to alkaline solution and water on the strength-porosity relationship of GFRP rebar[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2008, 39(5): 764-772.
- [9] Cândido G M, Costa M L, Rezende M C, et al. Hygrothermal effects on quasi-isotropic carbon epoxy laminates with machined and molded edges[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2008, 39(3): 490-496.
- [10] 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 Zhiguo, Yang Shengchun, Song Bifeng. 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. (in Chinese)
- [11] Mohan J, Ivanković A, Murphy N. Effect of prepreg storage humidity on the mixed-mode fracture toughness of a co-cured composite joint[J]. *Composites Part A*, 2013, 45(2): 23-34.
- [12] Amara K H, Tounsi A, Benzair A. Transverse cracking and elastic properties reduction in hygrothermal aged cross-ply laminates[J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2005, 396(1/2): 369-375.
- [13] Kundu C K, Han J H. Nonlinear buckling analysis of hygrothermoelastic composite shell panels using finite element method[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2009, 40(4): 313-328.
- [14] 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 Wei, Yan Ying, Su Ling. Damage analysis and strength prediction of composites structures in hygrothermal environment[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2010, 27(2): 113-116. (in Chinese)
- [15] 刘玉佳, 燕瑛, 何明泽, 等. 湿/热/力耦合条件下复合材料结构渐进损伤仿真[J]. *北京航空航天大学学报*, 2012, 38(3): 384-388, 393.  
Liu Yujia, Yan Ying, He Mingze, et al. Simulation of progressive damage on composite structure under hydro/thermo/mechanical coupled condition[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics*, 2012, 38(3): 384-388, 393. (in Chinese)

- [16] Lal A, Singh B N, Anand S. Nonlinear bending response of laminated composite spherical shell panel with system randomness subjected to hygro-thermo-mechanical loading[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2011, 53(10): 855-866.
- [17] Kumar R, Lal A, Patil H, et al. Hygrothermally induced buckling analysis of elastically supported laminated composite plates with random system properties[J]. *Journal of Composite Materials*, 2012, 46(21): 2711-2730.
- [18] Krzysztof Dems, Elzbieta Radaszewska, Jan Turant. Modeling of fiber-reinforced composite material subjected to thermal load[J]. *Journal of Thermal Stresses*, 2012, 35(7): 579-595.
- [19] 韩坤华, 余音, 汪海. 瞬态湿浓度分布对复合材料胶接修理强度的影响[C]//全国复合材料学术会议, 2012. Hang Kunhua, Yu Yin, Wang Hai. Effect of transient moisture distribution on composite bonded repair strength [C]//National Conference on Composite Materials, 2012. (in Chinese)
- [20] Balasubramanian M. Introduction to composite materials [M]. Springer, Singapore: Technomic Pub. Co, 1980.
- [21] Emam S, Eltaher M A. Buckling and postbuckling of composite beams in hygrothermal environments[J]. *Composite Structures*, 2016, 152: 665-675.
- [22] 徐颖, 温卫东, 崔海涛. 复合材料层合板疲劳逐渐累积损伤寿命预测方法[J]. *航空动力学报*, 2007, 22(4): 602-607. Xu Yin, Wen Weidong, Cui Haitao. Progressive fatigue damage analysis method of laminated composites[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(4): 602-607. (in Chinese)
- [23] 姚宇超, 许希武, 毛春见. 湿热环境下开孔复合材料层合板的强度[J]. *材料科学与工程学报*, 2015, 33(3): 425-431. Yao Yuchao, Xu Xiwu, Mao Chunjian. Strength of composite laminates with open hole under hygrothermal conditions[J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2015, 33(3): 425-431. (in Chinese)

### 作者简介:

谢伟(1978—),男,博士,副教授。主要研究方向:计算固体力学、结构疲劳与断裂、先进复合材料结构强度等。

窦鹏鹏(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:计算固体力学、复合材料等。

薛展(1995—),男,硕士研究生。主要研究方向:疲劳与断裂、复合材料力学等。

(编辑:赵毓梅)