

文章编号: 1000-8055(2023)11-2659-07

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220354

湿热环境下 ZT7H/5429 复合材料层合板的 拉伸性能

常楠¹, 辜良勇¹, 张勇波², 郭建超²

(1. 中国航空工业集团有限公司 成都飞机设计研究所, 成都 610091;

2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为湿热环境条件下 ZT7H/5429 复合材料层合板的拉伸破坏应变基准值提供了一种精细化确定方法。通过在不同湿热环境下对含孔复合材料层合板进行拉伸试验, 定量分析了温度和湿度对于层合板拉伸破坏应变的影响, 并采用小子样整体推断技术建立了拉伸破坏应变预测模型。结果表明: 拉伸破坏应变随温度升高而下降, 并且下降幅度趋于平缓, 而湿度所产生的影响并不显著。在拉伸破坏应变预测曲面的基础上, 通过引入单侧容忍系数进一步确定了拉伸破坏应变 B 基准值。相比传统单点法仅分析单一状态试验数据来获得 B 基准值, 该方法充分考虑了不同状态下试验数据之间的关系模型, 得到的 B 基准值具有 2%~25% 的提升, 为复合材料结构的精细化设计提供了理论依据。

关 键 词: 复合材料层合板; 湿热环境; 拉伸性能; B 基准值; 小子样

中图分类号: V258; TB332

文献标志码: A

Tensile properties of ZT7H/5429 composite laminates under hygrothermal environment

CHANG Nan¹, GU Liangyong¹, ZHANG Yongbo², GUO Jianchao²

(1. Chengdu Aircraft Design & Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Limited, Chengdu 610091, China;

2. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A refined method for determining the basis values of tensile failure strain for ZT7H/5429 composite laminates in hygrothermal environment was proposed. Through the tension tests of the composite laminates with open hole under different environmental conditions, the influence of temperature and humidity on the tensile failure strain was quantitatively analyzed, and a tensile failure strain prediction model was established based on small sample holistic inference technology. The results showed that the tensile failure strain decreased with the increase of temperature, and the decline became flat gradually, while the influence of humidity was not so significant. Based on the tensile failure strain prediction surface, the B-basis value of tensile failure strain was further determined by introducing one-sided tolerance-limit factor. Compared with the traditional single-point method of only analyzing the test results in the single state, the proposed method fully took into account the connection between the experimental data in different states and the B-basis values increased by 2% to 25% in most cases, providing a

收稿日期: 2022-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(52005159)

作者简介: 常楠(1982—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事飞机结构设计研究。

通信作者: 张勇波(1984—), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构安全与可靠性研究。E-mail: zhangyongbo@buaa.edu.cn

引用格式: 常楠, 辜良勇, 张勇波, 等. 湿热环境下 ZT7H/5429 复合材料层合板的拉伸性能[J]. 航空动力学报, 2023, 38(11): 2659-2665. CHANG Nan, GU Liangyong, ZHANG Yongbo, et al. Tensile properties of ZT7H/5429 composite laminates under hygrothermal environment[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(11): 2659-2665.

theoretical basis for the refined design of composite structures.

Keywords: composite laminates; hygrothermal environment; tensile property; B-basis value; small sample

先进复合材料以其高比强度、比刚度以及力学性能可设计等优异性能而被广泛应用于航空领域中^[1-3]。在飞机复合材料结构设计与校核中,许用值是指在一定的载荷与环境条件下,由试样、元件或细节件等试验数据确定的具有一定可靠度和置信度的性能表征值^[4-7]。

为充分保证结构的安全性、可靠性,航空工业往往计算复合材料结构的最终强度或是破坏应变试验结果的 B 基准值,即 95% 置信水平下,90% 母体的最小值,作为许用值^[8]。在 B 基准值计算方法中,美国军用手册 MIL-HDBL-17^[9]提出的单点法应用最为广泛。该方法假设同一类型试件的强度或是破坏应变的试验结果来自同一个分布母体,当样本数足够大时,该分布可以被近似给出,进而通过引入单侧容限系数计算出 B 基准值。目前通常考虑的分布包括 Weibull 分布、正态分布以及对数正态分布等。若这 3 种分布均不符合,则采用非参数法计算基准值。此外,在单点法的基础上,CMH-17 手册还发展出了多环境样本合并法^[10],其通过批间变异性检验能够将不同环境条件下具有相同破坏模式的试验样本进行合并进而计算 B 基准许用值。

目前复合材料性能许用值的确定总是以最为严重的湿热环境作为安全设计的保证^[5]。而实际上,只有极少的结构会在短时间内经历这样的环境条件,这就极大地限制了复合材料性能的发挥。倘若在统计分析复合材料结构环境谱的基础上,定量考虑环境要素对于复合材料性能的影响,则完全有可能改善现有复合材料许用值确定方法的保守性,从而充分发挥复合材料的性能优势。

在湿热环境中,由于各组元湿、热膨胀系数的不匹配,水蒸气扩散以及温度变化,复合材料的内部会产生湿、热残余应力。湿、热应力的联合作用往往会促使纤维与基体之间的界面发生脱黏与开裂等现象,造成载荷传递能力的下降^[11-13]。同时,湿热环境也会致使基体发生不可逆的变化,包括产生裂纹、水解、氧化等,进而引起材料性能的退化。为探究湿热环境对于复合材料力学性能的影响,许多学者开展了试验研究。其中,Gu 等人^[14-15]通过试验探究了湿热环境对于层合板层间剪切强度的影响。Perez-pacheco 等人^[16]分析了

吸湿对于复合材料拉伸强度以及失效模式的影响。Zhong 等人^[17-18]的研究表明水分能够改善层合板的抗冲击性能。此外,还有一些学者利用有限元仿真技术对湿热环境下复合材料的湿热行为^[19]、残余应力分布^[20]以及性能预测^[21]进行了研究。

本文以 ZT7H/5429 复合材料孔板为研究对象,选取 3 种湿度、4 种温度组合的环境条件,定量分析了温度、湿度对于复合材料拉伸性能的影响,并且采用小子样整体推断技术建立了拉伸破坏应变预测曲面,通过分析分散性信息进一步确定了拉伸破坏应变 B 基准值,为复合材料结构的精细化设计提供了理论依据。

1 试 验

1.1 试件与试验环境

试件由 ZT7H/5429 复合材料预浸料制备,铺层顺序为 $[-45/0/45/90/0/0/-45/90/45/0]_s$ 。如图 1 所示,试件的平面几何尺寸为 $250\text{ mm} \times 36\text{ mm}$,厚度为 2.5 mm ,中心孔直径为 6.35 mm 。纤维体积分数约为 60%。

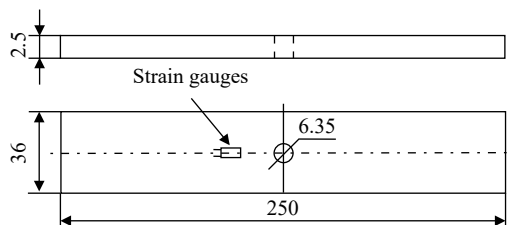


图 1 试件示意图(单位: mm)

Fig. 1 Schematic diagram of specimen (unit: mm)

为探究温度和湿度对于复合材料拉伸性能的影响,试验在不同环境条件下进行。如表 1 所示,试验共涉及 4 种温度(t)和 3 种相对湿度(U)。每种环境条件下,重复试验 7~8 次。试验前,试件首先需要在实验室标准环境下放置 24 h 以上。20% 湿度试件需要放置于湿热老化环境箱中 14 d 以上,湿度设置为 $(20 \pm 5)\%$,温度设置为 $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$; 50% 湿度试件放置于室内正常环境,室内湿度设置为 $(50 \pm 5)\%$,温度设置为 $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$; 80% 湿度试件在 $(82 \pm 2)^\circ\text{C}$ 水里浸泡 168 h,然后放入环境箱中 7 d 以上,湿度设置为 $(80 \pm 5)\%$,温度设置为 $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$ 。

表 1 ZT7H/5429 复合材料层合板试验矩阵
Table 1 ZT7H/5429 composite laminates test matrix

参数		数值及说明			
材料		ZT7H/5429			
铺层顺序		[-45/0/45/90/0/0/-45/90/45/0] _s			
开孔直径/mm		6.35			
试件尺寸/mm ³		250 × 36 × 2.5			
温度/℃		25	60	100	130
试件 数量	相对 湿度/%	20	8	8	8
		50	8	8	7
		80	8	8	8

1.2 试验过程

参照 ASTM D 5766 标准^[22]对试件进行拉伸试验。试验在带有高低温环境箱的 100 kN 试验机上进行,以 2 mm/min 的加载速率对试件连续施加拉伸载荷,直至试件破坏,停止试验,记录试件破坏前的最大拉伸应变及试件的破坏模式。拉伸破坏应变从应力应变曲线中提取。图 2 给出了 ZT7H/5429 复合材料孔板的拉伸破坏模式。可以看出,钉孔周围出现了大范围的-45°的纤维剪切和纤维断裂。



图 2 试件破坏模式

Fig. 2 Failure mode of specimens

2 结果与分析

2.1 温度的影响

在 20% 相对湿度下, ZT7H/5429 复合材料孔板拉伸试验结果如图 3 所示。可以看到,随着温度的升高,试件的拉伸破坏应变逐渐降低,到达高温时,下降幅度趋于平缓。与 25 ℃ 室温情况相比,60、100 ℃ 和 130 ℃ 下试件的拉伸破坏应变均值分别下降了 7.04%、15.25% 和 11.86%。建

立温度的幂函数模型来近似描述温度对于开孔层合板拉伸破坏应变的影响:

$$\varepsilon_t = Ct^m \tag{1}$$

式中 ε_t 为拉伸破坏应变(10^{-6}); t 为温度(℃); C 、 m 为待定参数。

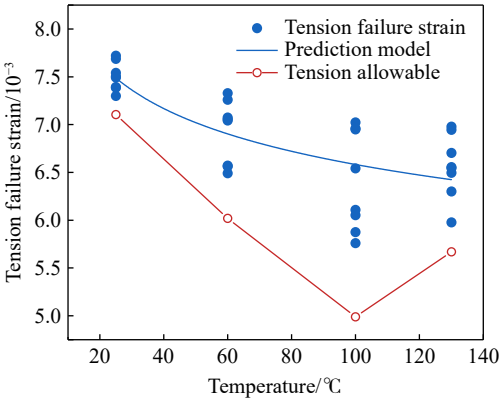


图 3 20% 相对湿度下拉伸试验结果

Fig. 3 Tensile tests results under 20% relative humidity

对式(1)方程两边取对数,并考虑拉伸破坏应变为随机变量,可得

$$\ln \varepsilon_t = \ln C + m \ln t + \varepsilon \tag{2}$$

式中 $\varepsilon \sim N(0, s^2)$ 为零均值的正态随机变量。依据试验数据,采用传统的回归分析方法对式(2)中的待定参数进行求解,估计结果如表 2 所示,表中 $\hat{C}$ 、 $\hat{m}$ 为待定参数 C 、 m 的估计值。在图 3 中可以看到,式(1)可以较好地描述开孔层合板拉伸破坏应变随温度变化的规律。

表 2 线性回归分析结果

Table 2 Results of linear regression analysis

相对湿度/%	$\hat{C}$	$\hat{m}$
20	10 099	-0.093
50	7 518	-0.015
80	8 243	-0.043

利用单点法^[23]对单一状态下的试验结果进行处理,得到拉伸破坏应变 B 基准值 ε_{tB} :

$$\varepsilon_{tB} = \bar{\varepsilon}_t - ks \tag{3}$$

$$k = \sqrt{\frac{2n-3}{2n-4}} \left(1 - \frac{t_y^2}{w} \right)^{-1} \times \left[t_R + t_y \sqrt{\frac{1}{n} \left(1 - \frac{t_y^2}{w} \right) + \frac{t_R^2}{w}} \right] \tag{4}$$

$$w = 2 \left(n + t_\gamma - 1.645 - \frac{1}{\sqrt{n + t_\gamma - 1.645}} \right) \quad (5)$$

式中 ε_t 为单一状态下的拉伸破坏应变均值; k 为单侧容限系数; s 为拉伸破坏应变标准差; w 为中间变量; n 为试件数; t_R 为可靠度的标准正态偏量; t_γ 为置信度的标准正态偏量。

在图 3 中,按照 B 基准值(可靠度为 90%,置信度为 95%)形式给出了不同状态下的拉伸许用值。随着温度的增加,拉伸许用值整体呈下降趋势。而由于 130 °C 下的试验数据较为集中,分散性较低,许用值有所增加。

同样地,对 50% 相对湿度和 80% 相对湿度下的试验结果进行处理分析,其结果如图 4、图 5 所示。可以观察到:在 50% 相对湿度下,拉伸破坏应变随温度变化并不明显,130 °C 温度时,分散性升高使得拉伸许用值有所下降;在 80% 相对湿度下,拉伸破坏应变随温度升高而降低,而温度升至 130 °C 时,拉伸破坏应变均值的升高使得拉伸许用值有所增加。

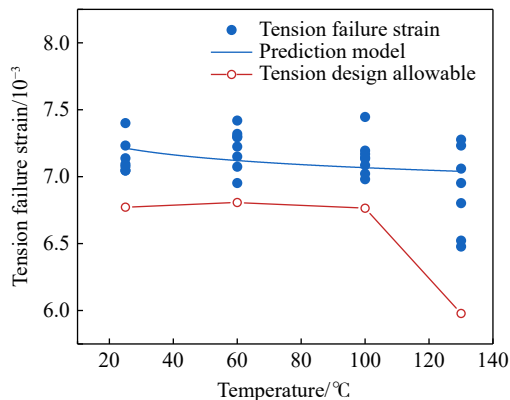


图 4 50% 相对湿度下拉伸试验结果

Fig. 4 Tensile tests results under 50% relative humidity

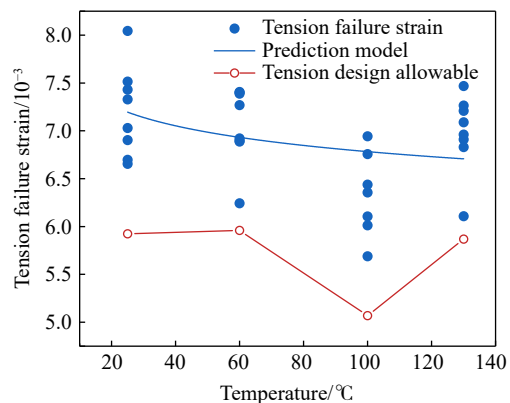


图 5 80% 相对湿度下拉伸试验结果

Fig. 5 Tensile tests results under 80% relative humidity

2.2 湿度的影响

温度一定的情况下,拉伸破坏应变随相对湿度(U)变化关系如图 6 所示。可以看到,不同温度条件下,拉伸破坏应变受湿度变化的影响均较小。

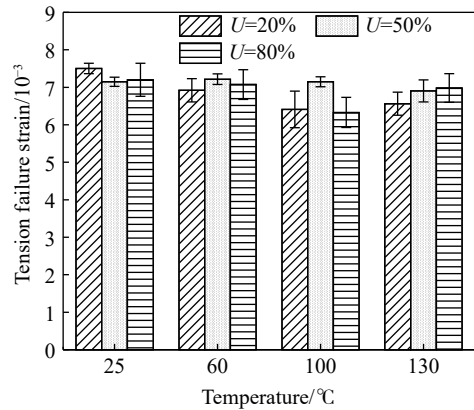


图 6 拉伸试验结果

Fig. 6 Results of tensile tests

2.3 方差变化规律分析

从上述单因素和单状态的分析中可以看到,单个状态的拉伸许用值并不是完全随着温度或湿度的升高而降低,某些状态下反倒会出现增加的情况。其主要原因在于试验数据的分散性影响到单个状态的上下波动,因而无法得到规律的拉伸许用值。通过分析分散性信息发现对数拉伸破坏应变标准差会随着对数温度线性变化,其如图 7 所示。如果将这种线性变化规律考虑到整体的预测模型中,将会有效提高许用值的估计精度。

对数拉伸破坏应变标准差随温度变化的规律可描述为

$$\sigma = \eta_0 + \eta_1 \ln t \quad (6)$$

式中 σ 为对数拉伸破坏应变标准差; η_0 、 η_1 为待定参数。

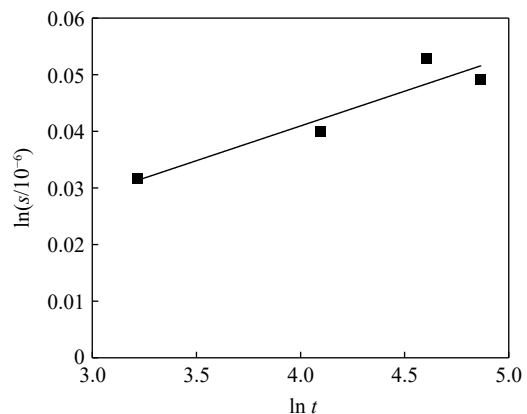


图 7 对数拉伸破坏应变标准差

Fig. 7 Logarithmic standard deviation of tensile failure strain

2.4 拉伸破坏应变预测模型

综合考虑温度和湿度对于复合材料孔板拉伸破坏应变的影响, 提出一种拉伸破坏应变预测模型:

$$\varepsilon_t = C t^m e^{\lambda U} \quad (7)$$

式中 λ 为待定参数。

对式(7)两端取自然对数并考虑拉伸应变为一随机变量, 有

$$\ln \varepsilon_t = \ln C + m \ln t + \lambda U + \varepsilon' \quad (8)$$

其中 $\varepsilon' \sim N(0, \sigma^2)$ 为随机变量; 并设 $y = \ln \varepsilon_t$, $x_1 = \ln t$, $x_2 = U$ 以及 $a = \ln C$, $b_1 = m$, $b_2 = \lambda$, 则式(6)、式(8)可分别写为

$$\sigma = \eta_0 + \eta_1 x_1 \quad (9)$$

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \varepsilon' \quad (10)$$

由于因变量和标准差均呈线性变化, 因此可通过线性异方差回归分析方法^[24]对参数进行估计。

根据式(9), 标准差可写成

$$\sigma = \sigma_0 [1 + \theta(x_1 - x_{01})] \quad (11)$$

式中 σ_0 、 θ 、 x_{01} 为待定参数。

对一组通过 n 次独立试验得到的样本 (x_{1i}, x_{2i}, y_i) , $i = 1, 2, \dots, n$, 常数 x_{01} 可取为

$$x_{01} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{1i} \quad (12)$$

记 $I(x_1)$ 为

$$I(x_1) = 1 + \theta(x_1 - x_{01}) \quad (13)$$

按照最小二乘原理, 加权平方和可以写为

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - a - b_1 x_{1i} - b_2 x_{2i})^2}{I^2(x_{1i})} \quad (14)$$

拉伸破坏应变预测曲面中的待定参数 a 、 b_1 、 b_2 、 θ 应使 Q 最小, 于是有

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - a - b_1 x_{1i} - b_2 x_{2i})}{I^2(x_{1i})} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial b_1} = -2 \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - a - b_1 x_{1i} - b_2 x_{2i}) x_{1i}}{I^2(x_{1i})} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial b_2} = -2 \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - a - b_1 x_{1i} - b_2 x_{2i}) x_{2i}}{I^2(x_{1i})} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \theta} = -2 \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - a - b_1 x_{1i} - b_2 x_{2i}) (x_{1i} - x_{01})}{I^3(x_{1i})} = 0 \quad (18)$$

求解上述方程, 求得参数估计量的表达式为

$$\hat{a} = \bar{y} - \hat{b}_1 \bar{x}_1 - \hat{b}_2 \bar{x}_2 \quad (19)$$

$$\hat{b}_1 = \frac{l_{22} l_{1y} - l_{12} l_{2y}}{l_{11} l_{22} - l_{12}^2} \quad (20)$$

$$\hat{b}_2 = \frac{l_{11} l_{2y} - l_{12} l_{1y}}{l_{11} l_{22} - l_{12}^2} \quad (21)$$

式中

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{I_i^2} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{I_i^2},$$

$$I_i = 1 + \theta(x_{1i} - x_{01}), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\bar{x}_1 = \sum_{i=1}^n \frac{x_{1i}}{I_i^2} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{I_i^2}, \quad \bar{x}_2 = \sum_{i=1}^n \frac{x_{2i}}{I_i^2} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{I_i^2},$$

$$l_{jk} = \sum_{i=1}^n \frac{(x_{ji} - \bar{x}_j)(x_{ki} - \bar{x}_k)}{I_i^2},$$

$$l_{jy} = \sum_{i=1}^n \frac{(x_{ji} - \bar{x}_j)(y_i - \bar{y})}{I_i^2}, \quad j, k = 1, 2$$

此外, σ_0 的估计量为

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{1}{n-4} \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{a} - \hat{b}_1 x_{1i} - \hat{b}_2 x_{2i})^2}{I^2(x_{1i})}} \quad (22)$$

最终, 待定参数的估计结果如表 3 所示。

得到的拉伸破坏应变预测曲面如图 8 所示。

表 3 线性异方差回归分析结果

Table 3 Results of linear variance regression analysis

参数	$\hat{C}$	$\hat{m}$	$\hat{\lambda}$	$\hat{\eta}_0$	$\hat{\eta}_1$
估计结果	8 552	-0.052	-0.014	0.012	-0.008

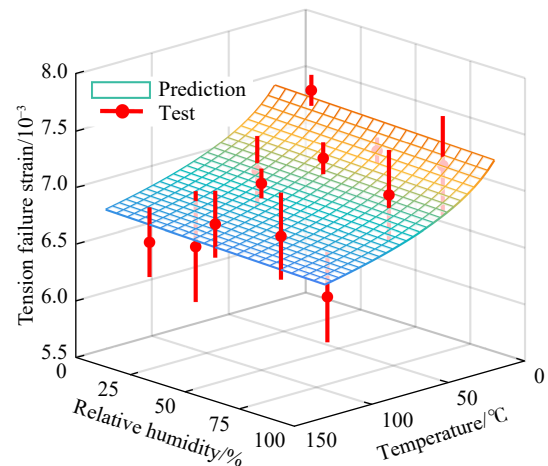


图 8 拉伸破坏应变预测曲面

Fig. 8 Tensile failure strain prediction surface

上述计算结果表明本文提出的拉伸破坏应变预测曲面可以较好地描述拉伸破坏应变随温度、湿度变化的规律。

2.5 拉伸许用值确定方法

在拉伸破坏应变预测模型的基础上,进一步计算可靠度为 R ,置信度至少为 γ 的拉伸许用值 ε_{IB} :

$$\varepsilon_{\text{IB}} = Ct^m e^{\lambda R - k\sigma} \quad (23)$$

根据式(23),给出如图9所示的B基准形式的拉伸许用值曲面。

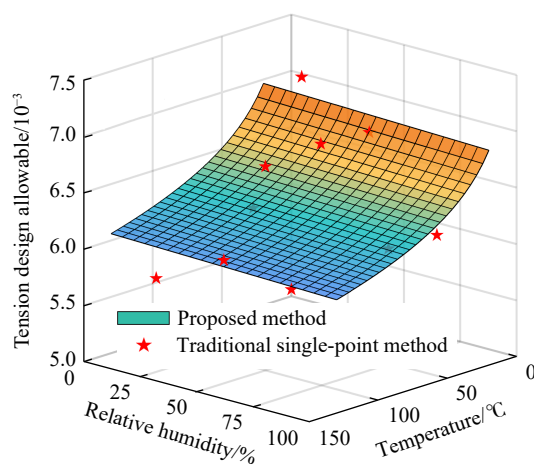


图9 拉伸许用应变曲面

Fig. 9 Tensile allowable strain surface

传统单点法虽然也能进行单个状态下的许用值计算,但是特别依赖于当前试验数据的均值与方差,因此许用值的波动往往较大,估计精度较低,偏保守,这一点可以从图3~图5中看出。

而本文通过研究温度、湿度对于复合材料孔板拉伸破坏应变的影响,分析标准差的变化规律,将不同状态下的试验数据作为一个整体进行分析,与传统方法的比较如表4所示。

可以看出,本文方法通过考虑不同温湿环境对拉伸破坏应变的影响,并由此建立起的计算模型可以充分利用各个环境的横向信息,扩大了许用值计算的样本量,进而使得计算出来的许用值曲面相比于仅用单点试验数据计算得到的设计许用值有2%~25%的提升。总体来说,采用本文方法弥补了单点计算方法样本量不足的缺点,使得设计许用值的计算更加精细与准确。

表4 传统单点法与本文方法比较

Table 4 Comparison of the traditional single-point method with the proposed method

温度/℃	相对湿度/%	拉伸许用值/ 10^{-6}		提升率/%
		单点法	本文方法	
25	20	7 150	6 965	-2.59
25	50	6 819	6 948	1.90
25	80	6 069	6 931	14.21
60	20	6 122	6 549	6.98
60	50	6 853	6 533	-4.67
60	80	6 084	6 517	7.12
100	20	5 149	6 318	22.70
100	50	6 807	6 303	-7.41
100	180	5 225	6 287	20.34
130	20	5 771	6 203	7.48
130	50	6 092	6 188	1.57
130	80	5 994	6 172	2.98

3 结 论

本文通过分析 ZT7H/5429 复合材料孔板在不同环境条件下的拉伸破坏应变,探究了环境温度和相对湿度对于复合材料拉伸性能的影响,得出了以下结论:

1) 湿度一定的情况下,拉伸破坏应变随温度的升高而降低,并且降低幅度逐渐趋于平缓。

2) 通过综合考虑温度和湿度所带来的影响,拉伸破坏应变可根据整体预测曲面来近似给出,预测精度在 5% 左右。

3) 相比单点法需要进行大量试验来保证估计精度,本文方法是一种多状态、小样本的拉伸破坏应变基准值估计方法,得到的拉伸许用值大多可获得 2%~25% 的提升,为复合材料结构的精细化设计提供了理论依据。

参考文献:

- [1] GARG A, CHALAK H D. A review on analysis of laminated composite and sandwich structures under hygrothermal conditions[J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 142: 205-226.
- [2] NACHTANE M, TARFAOUI M, SASSI S, et al. An investigation of hygrothermal aging effects on high strain rate behaviour of adhesively bonded composite joints[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 172: 111-120.
- [3] LIU T Q, LIU X, FENG P. A comprehensive review on mechanical properties of pultruded FRP composites subjected to long-term environmental effects[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 191: 107958.1-107958.57.
- [4] LIU W C. Principles for determining material allowable and design allowable values of composite aircraft structures[J]. *Procedia Engineering*, 2019, 247: 111-120.

- neering, 2011, 17: 279-285.
- [5] 沈真. 复合材料飞机结构设计许用值及其确定原则[J]. *航空学报*, 1998, 19(4): 2-9.
SHEN Zhen. Design allowables of composite aircraft structures and their determination principles[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1998, 19(4): 2-9. (in Chinese)
- [6] 杨乃宾, 章怡宁. 复合材料飞机结构设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002: 88-101.
- [7] VALLMAJO O, COZAR I R, FURTADO C, et al. Virtual calculation of the B-value allowables of notched composite laminates[J]. *Composite Structures*, 2019, 212: 11-21.
- [8] CANDIDO 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.
- [9] US Department of Defense. Composite materials handbook: Volume 1 polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials MIL-HDBK-17-1F[M]. Washington DC: Department of Defense, 2002: 466-490.
- [10] Federal Aeronautics Administration. Composite materials handbook (CMH-17): Volume 1 polymer matrix composites[M]. New York: SAE International, 2012: 3387-3416.
- [11] 刘衰财, 刘湘云. 民机复合材料结构设计许用值及其确定方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2018, 50(1): 81-85.
LIU Shuaicai, LIU Xiangyun. Design allowableness and evaluation methods of civil aircraft composite structures[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 50(1): 81-85. (in Chinese)
- [12] ROCHA I B C M, RAIJMAEKERS S, NIJSSEN R P L, et al. Hygrothermal ageing behaviour of a glass/epoxy composite used in wind turbine blades[J]. *Composite Structures*, 2017, 174: 110-122.
- [13] ZAFAR A, BERTOCCO F, SCHJODT-THOMSEN J, et al. Investigation of the long term effects of moisture on carbon fibre and epoxy matrix composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2012, 72(6): 656-666.
- [14] GU Y, LIU H, LI M, et al. Macro- and micro-interfacial properties of carbon fiber reinforced epoxy resin composite under hygrothermal treatments[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2013, 33(4): 369-379.
- [15] TSERPES K, TZATZADAKIS V, KATSIROPOULOS C. Effect of hygrothermal ageing on the interlaminar shear strength of carbon fiber-reinforced rosin-based epoxy bio-composites[J]. *Composite Structures*, 2019, 226: 111211.1-111211.3.
- [16] PEREZ-PACHECO E, CAUICH-CUPUL J I, VALADEZ-GONZÁLEZ A, et al. Effect of moisture absorption on the mechanical behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites[J]. *Journal of Material Science*, 2013, 48(5): 1873-1882.
- [17] ZHONG Y, JOSHI S C. Impact resistance of hygrothermally conditioned composite laminates with different lay-ups[J]. *Journal of Composite Materials*, 2015, 49(7): 829-841.
- [18] AOKI Y, YAMADA K, ISHIKAWA T. Effect of hygrothermal condition on compression after impact strength of CFRP laminates[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(6): 1376-1383.
- [19] ZENKOUR A M. Hygrothermal effects on the bending of angle-ply composite plates using a sinusoidal theory[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(12): 3685-3696.
- [20] 赵锐. 三维编织碳纤维/环氧树脂基复合材料的湿热残余应力研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
ZHAO Rui. Study on hygrothermal residual stress of 3D braided carbon fiber/epoxy resin composites[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [21] ZHANG J, QI D, ZHOU L, et al. A progressive failure analysis model for composite structures in hygrothermal environments[J]. *Composite Structures*, 2015, 133: 331-342.
- [22] Standard test method of open-hole tensile strength of polymer matrix composite laminates: ASTM D5766/D5766M-11[S]. West Conshohocken, US: ASTM International, 2018: 1-7.
- [23] 傅惠民. 二维单侧容限系数方法[J]. *航空学报*, 1993, 14(3): 166-172.
FU Huimin. A method of two-dimensional one-sided tolerance factors[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1993, 14(3): 166-172. (in Chinese)
- [24] 傅惠民. 线性异方差回归分析[J]. *航空学报*, 1994, 15(3): 295-302.
FU Huimin. Linear variance regression analysis[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1994, 15(3): 295-302. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)