

文章编号: 1000-8055(2023)09-2231-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210724

航空复合材料加筋板湿热环境下吸湿性能

刘宋婧¹, 冯 宇^{1,2}, 张 腾¹, 毕亚萍¹, 张铁军¹

(1. 空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038;

2. 西北工业大学 航空学院, 西安 710129)

摘 要: 为探究复合材料加筋板湿热环境下的吸湿性能,开展了 70 ℃、水浴环境下复合材料加筋板吸湿试验,分析其吸湿量变化规律,并通过数据拟合进行验证。针对 Fick 吸湿模型的局限性,提出了考虑侧边吸湿效应的修正两阶段吸湿模型;同时基于有限元方法建立了加筋板吸湿性能有限元分析模型,模拟吸湿过程中加筋板内水分的扩散及分布规律。结果表明:试验中 3 件试验件饱和吸湿量分别为 0.702%、0.696% 和 0.687%,且吸湿过程可分为前期线性快速吸湿和后期吸湿速率放缓直至平衡两个阶段。利用试验数据验证了修正模型计算结果的准确性,通过与文献对比证明了该模型可提高预测精度。通过有限元模型发现试件表面迅速达到吸湿平衡,薄板区域比厚板区域更快达到吸湿平衡状态。

关 键 词: 吸湿规律; 复合材料加筋板; 湿热环境; 有限元仿真; 修正两阶段吸湿模型

中图分类号: V258+.3; TB332

文献标志码: A

Moisture absorption performance of composite stiffened panels in hygrothermal environment

LIU Songjing¹, FENG Yu^{1,2}, ZHANG Teng¹, BI Yaping¹, ZHANG Tiejun¹

(1. Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: In order to investigate the moisture absorption performance of composite stiffened panels in hygrothermal environment, the moisture absorption experiment of composite stiffened panels under 70 ℃ and water bath environment was carried out to analyze the law of moisture absorption, and verified by data fitting. In view of the limitations of the Fick moisture absorption model, a modified two-stage moisture absorption model considering the side moisture absorption effect was proposed. At the same time, based on the finite element method, the analysis model of the moisture absorption performance of the stiffened panels was established to simulate the diffusion and distribution of moisture in the moisture absorption process. The results showed that the saturated moisture absorption of the three experiment specimens was 0.702%, 0.696% and 0.687%, respectively, and the moisture absorption process can be divided into two stages: linear rapid moisture absorption in the early stage and lower absorption rate until equilibrium in the later stage. The accuracy of the calculation results of the model was verified by using the experimental data, and comparison with the literature proved that the model can improve the prediction accuracy. Through the finite element model, the results exhibited that the surface of the specimen reached moisture

收稿日期: 2021-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(51805538, 62003368); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2020JQ-476, 2021JQ-357, 2020JQ-477, 2023-JC-YB-314); 中国博士后科学基金(2020M683570, 2021T140561); 国家自然科学基金青年基金(62003368, 51908548)

作者简介: 刘宋婧(1999—), 女, 硕士生, 主要从事航空复合材料结构强度研究。

通信作者: 冯宇(1989—), 男, 讲师, 博士, 主要从事航空复合材料研究。E-mail: fynuaa@126.com

引用格式: 刘宋婧, 冯宇, 张腾, 等. 航空复合材料加筋板湿热环境下吸湿性能[J]. 航空动力学报, 2023, 38(9): 2231-2240. LIU Songjing, FENG Yu, ZHANG Teng, et al. Moisture absorption performance of composite stiffened panels in hygrothermal environment[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(9): 2231-2240.

absorption equilibrium rapidly, and the thin plate area reached moisture absorption equilibrium faster than the thick plate area.

Keywords: law of moisture absorption; composite stiffened panel; hygrothermal environment; finite element analysis; modified two-stage moisture absorption model

复合材料是 20 世纪 60~70 年代出现的一种新型材料,通常由两种以上(包括两种)的材料在不同的尺寸维度下通过物理或化学变化而形成^[1],具有比强度高、比刚度大、抗疲劳性能好、易实现材料结构一体化设计制造和减少零部件装配连接等优点^[2-3],在军民用飞机上的应用得到了快速发展。早先复合材料主要应用于飞机的非承力部位,随着科学技术的不断提高,当今复合材料越来越多地应用到机身梁、框等主承力结构中^[4-5]。尤其是在平尾、垂尾等部位中广泛使用了复合材料加筋板结构^[6-7]。

然而除上述优点外,复合材料对冲击损伤、环境等因素敏感的缺陷也制约着复合材料的进一步应用,其中湿热环境因素对复合材料的影响备受关注。长期湿热环境作用会使复合材料性能发生明显退化。尤其是军民用飞机服役时间较长,一般为 25~30 年^[8-9],难免会受到湿热环境的影响,且复合材料在湿热环境中的吸湿过程一般无法通过目视观察直接得到,增加了甄别湿热环境因素对复合材料影响的难度,严重威胁飞机结构安全^[10],因此十分有必要研究长期处在湿热环境下的复合材料吸湿过程和吸湿规律,建立一种预测值更加接近试验数据的吸湿模型。

关于复合材料加筋板、层合板等飞机典型复合材料结构吸湿特性和湿热环境对其性能影响的研究,许多学者从试验、仿真分析等多角度进行了有益探索:余海燕等^[11]进行了碳纤维复合材料(CFRP)层合板在 25、50 °C 加速水浴条件下的吸湿试验,结果表明:CFRP 层合板在 50 °C 水浴温度下的平均饱和吸湿率为 0.77%,高于在 25 °C 下的(0.33%);在相同吸湿时间下,50 °C 水浴温度下的吸湿率大于 25 °C 下的。吴以婷等^[12]研究了湿热环境下 carbon/epoxy 复合材料层合板的动态压缩性能。该文献首先对层合板试件进行了湿热处理,随后开展了干/湿态试件高应变率压缩试验。结果表明:材料脱(吸)湿过程呈现出两段式特点,层合板强度在垂直铺层方向具有显著的应变率敏感性。牛一凡等^[13]以碳纤维/环氧树脂(T700/TR1219B)复合材料为对象,采用湿度场和温度场

单一及耦合的方式研究了不同湿热环境下其弯曲性能的变化。结果表明:T700/TR1219B 复合材料的弯曲性能受湿度场和温度场影响下降明显,高温高湿环境下弯曲性能陡降的温度区间前移,且性能衰减并非单一湿度场和温度场下衰减量的简单叠加。回丽等^[14]开展了复合材料层合板在不同水浸温度影响下的吸湿动力模型研究,通过吸湿试验得到了不同水浸温度下的吸湿曲线,结合 Arrhenius 关系和 Fick 定律,得到吸湿模型,并准确预估了复合材料在 95 °C 恒温水浴中达到特定吸湿量的时间和任意时刻的吸湿量。Zhang 等^[15]基于 Fick 吸湿模型并根据加筋板各部位厚度不同提出了两阶段吸湿模型,该模型认为加筋板厚度较薄的区域首先达到吸湿平衡状态,然后较厚的区域开始吸湿直至吸湿平衡,因此从理论上可以将复合材料分为两个吸湿阶段,且该模型能够较好地描述复合材料加筋板的吸湿规律。冯宇等^[16]研究了吸湿饱和状态下 CCF300/5228A 复合材料加筋板的力学性能,该文献首先开展了 70 °C/95%RH(相对湿度)湿热环境下的吸湿试验,使加筋板达到吸湿饱和状态,两类试验件中截面蒙皮屈曲半波方向恰好相反,吸湿饱和加筋板破坏位置具有较高的不确定性。张先航等^[17]研究了复合材料加筋板的吸湿特性,开展了 70 °C/85%RH 湿热环境下的吸湿试验,提出了基于厚度划分的 Fick 吸湿模型,并利用有限元软件进行仿真分析,结果表明:提出的模型可较好地预测吸湿行为,精度较高,有限元仿真验证了模型的合理性与准确性,较好地还原了材料内部吸湿过程。

综上所述,目前关于复合材料吸湿行为的研究大多是基于复合材料层合板进行的,关于湿热环境对加筋板性能影响的研究较少,且大多着重于加筋板吸湿行为的现象观察和数据的对比分析,缺乏对加筋板在湿热环境中吸湿规律的总结、验证以及吸湿过程的仿真模拟。另外,传统的 Fick 吸湿模型采用归一化思想,不能精确预测吸湿后期的复合材料吸湿量。针对上述问题,本文以飞机典型部件级结构复合材料加筋板为对象,研究湿热环境下复合材料加筋板的吸湿性能和规律;

提出考虑加筋板侧边吸湿的修正两阶段吸湿模型,并结合试验数据验证其有效性;最后,应用有限元模拟软件 ABAQUS 建立吸湿模型,厘清加筋板吸湿分布规律。

1 复合材料加筋板吸湿试验

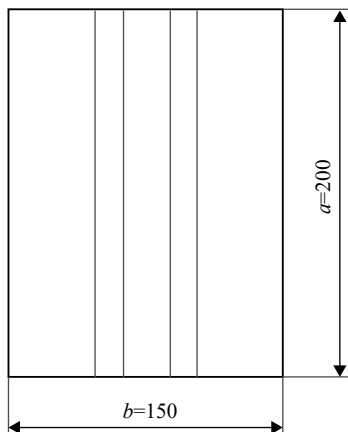
1.1 试验件

复合材料加筋板试验件如图 1 所示,包含了筋条与蒙皮的典型结构特征,蒙皮尺寸为 200 mm(长)×150 mm(宽),如图 2(a)所示;筋条侧面几何形状为“工”字型,其几何尺寸如图 2(b)所示。为准确反映加筋板的吸湿过程,本文共进行了 3 件加筋板在湿热环境下的吸湿试验,3 件试验件分别编号 1#、2#和 3#。试验件所用材料有两种:一种是碳纤维环氧树脂基单向带 UD BA9916-II/HF10A-3K,其厚度为 0.125 mm;另一种是碳纤维环氧树脂基平纹织物 BA9916-II/HFW220TA,其厚度为 0.23 mm。试验件蒙皮共 20 层,铺层顺序为 $[-45^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}]_s$,筋条共 22 层,铺层顺序为 $[-45^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}]_s$,其中蒙皮表层 -45° 为平纹织物 BA9916-II/HFW220TA 材料,其余层为 UD BA9916-II/HF10A-3K 材料,筋条铺层均为 UD BA9916-II/HF10A-3K 材料。

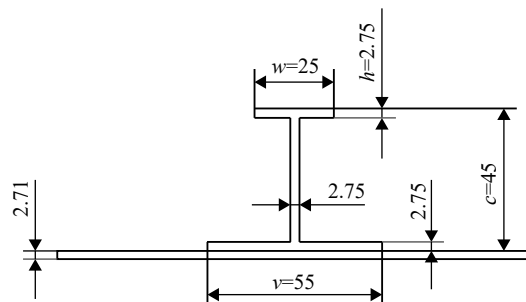


图 1 试验件

Fig. 1 Specimen



(a) 蒙皮的几何尺寸



(b) 筋条的几何尺寸

图 2 试验件的几何尺寸(单位: mm)

Fig. 2 Physical dimensions of specimen (unit: mm)

1.2 吸湿试验方法

在进行吸湿试验前,将试验件放入 70 ℃ 的烘干箱里进行干燥处理,以 24 h 为周期测量试验件的质量,称量设备为电子天平(精度为 0.001 g,如图 3 所示),直到试验件质量在连续 3 个测量周期内的变化量小于 0.01%,则停止干燥处理,认为试验件达到了工程干态。吸湿试验的湿热环境根据 ASTM D5229/D5229M^[18] 确定为水浴、70 ℃,在湿热环境箱中进行(温度精度为 0.1 ℃,如图 4 所示)。吸湿过程中每 24 h 对试验件的质量进行称量。根据 ASTM D5229/D5229M 可知吸湿饱和的判断是连续 3 个测量周期内试验件质量的变化

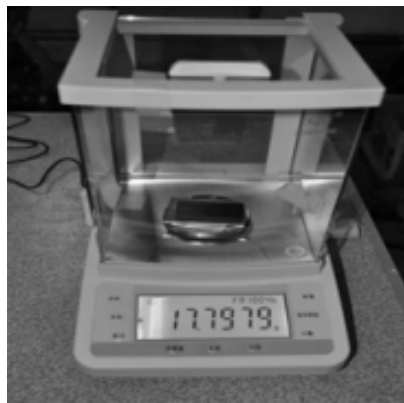


图 3 电子天平

Fig. 3 Electronic balance



图 4 湿热环境箱

Fig. 4 Hygrothermal environment box

量小于 0.01%。

测量试验件质量时,从水浴环境中将试验件取出并用滤纸迅速擦干其表面水分,立即称量。吸湿量 M 如式(1)所示,其中 m_i 为第 i 个周期得到的试验件质量, m_0 为工程干态下的试验件质量,判断相邻周期内的吸湿量变化量 ΔM 如式(2)所示:

$$M = \frac{m_i - m_0}{m_0} \quad (1)$$

$$\Delta M = \frac{m_i - m_{i-1}}{m_i} \quad (2)$$

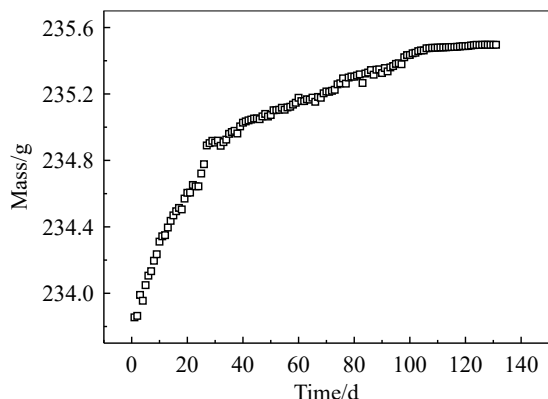
2 吸湿量变化规律

2.1 吸湿数据及分析

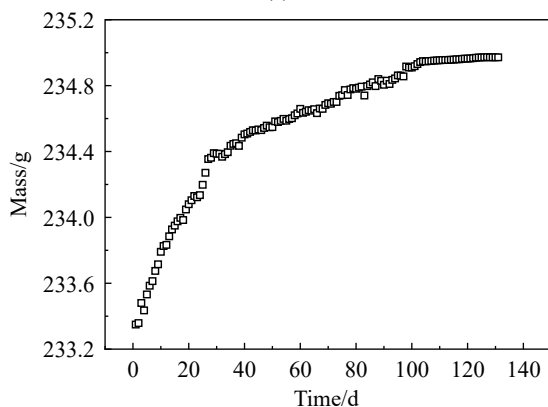
由于各试验件初始质量存在差异,故将 3 件试验件质量随吸湿时间的变化规律绘于图 5,图中横坐标为吸湿时间,纵坐标为试验件质量。1#、2#和 3#试验件的初始质量分别为 233.855 g、233.349 g 和 231.661 g,共吸湿时间为 131 d,质量分别增加 1.641 g、1.623 g 和 1.592 g,对应的饱和吸湿量分别为 0.702%、0.696% 和 0.687%。从图中可看出,在吸湿试验前期,试验件质量增加较快,此阶段约为 0~30 d,当吸湿时间超过 30 d 后,试验件质量增大的速率明显放缓直至平稳,120 d 后试验件质量基本不再增加,可以认为此时刻试验件已达到工程吸湿平衡状态。

为形象对比展示 3 件试验件质量随吸湿时间的变化规律和变化趋势,将 1#、2#和 3#试验件的质量变化规律及它们的平均质量变化趋势绘于图 6 中。不难看出,3 件试验件的质量变化和它们的平均质量变化规律基本一致,大致可分为两个阶段:第 I 阶段为吸湿前期的线性快速吸湿阶段;第 II 阶段为吸湿后期吸湿速率逐渐放缓直至平衡阶段。

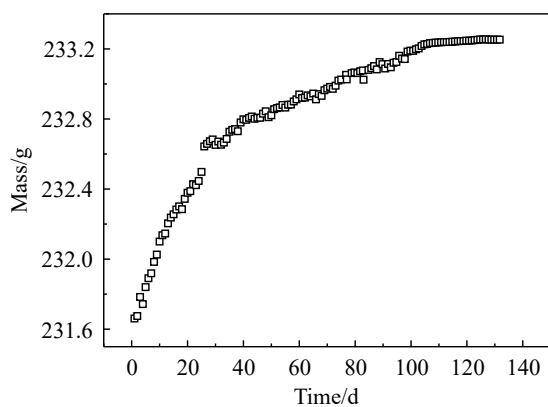
为进一步验证吸湿阶段的假设,以 3 件试验件的平均质量变化数据为对象,对其进行数据拟合处理。经上述分析,第 I 阶段利用最小二乘法对其进行线性拟合,第 II 阶段采用二次多项式拟合,数据拟合曲线如图 7 所示,拟合方程、拟合优度 R^2 如表 1 所示。两部分的拟合优度 R^2 均大于 0.95,拟合精度较高。通过数据拟合,验证了前文对吸湿过程的假设,明确了吸湿过程可分为前期线性快速吸湿和后期吸湿速率逐渐放缓直至平衡两个阶段。



(a) 1#试验件



(b) 2#试验件



(c) 3#试验件

图 5 3 件试验件质量变化趋势

Fig. 5 Mass change trend of three specimens

2.2 修正两阶段吸湿模型

研究复合材料的吸湿行为离不开吸湿模型,其中 Fick 吸湿模型作为应用最为广泛的描述复合材料吸湿性能的模型,能够较好地描述碳纤维树脂基复合材料的吸湿规律和吸湿特性,通常情况下典型的 Fick 吸湿扩散模型的吸湿动力学曲线如图 8 所示。

依据吸湿时间将吸湿过程分为 2 个阶段:第 I 阶段为吸湿前期,吸湿速率较快,水分主要通过复合材料本身的缝隙、缺陷等快速通道进入材料内部;当吸湿时间不断累积即达到第 II 阶段时,材

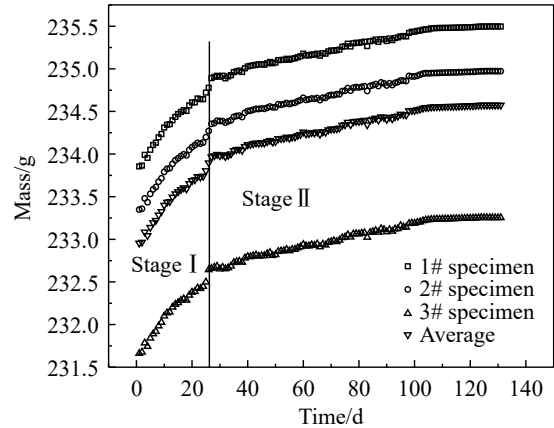


图 6 3 件试验件及其平均质量变化趋势

Fig. 6 Mass change trend of three specimens and their averaged mass

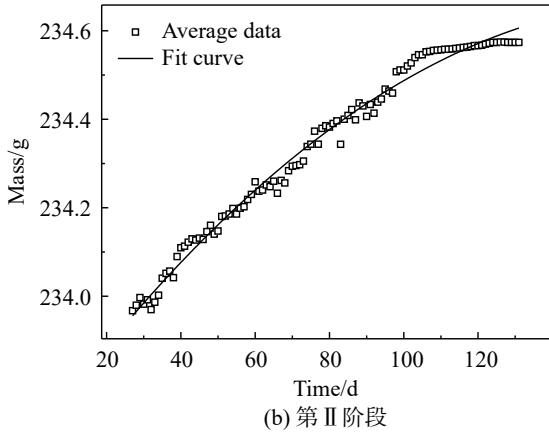
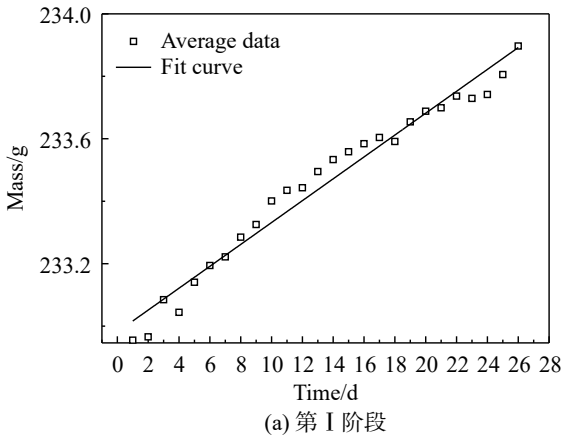


图 7 吸湿第 I、II 阶段拟合曲线

Fig. 7 Moisture absorption fitting curves of stage I and II

表 1 不同阶段的拟合方程数据		
Table 1 Fitting equation data at different stages		
参数	第 I 阶段	第 II 阶段
拟合方程	$y=0.035x+232.98$	$y=-3 \times 10^{-5}x^2+0.0098x+233.95$
拟合优度 R^2	0.9699	0.9885

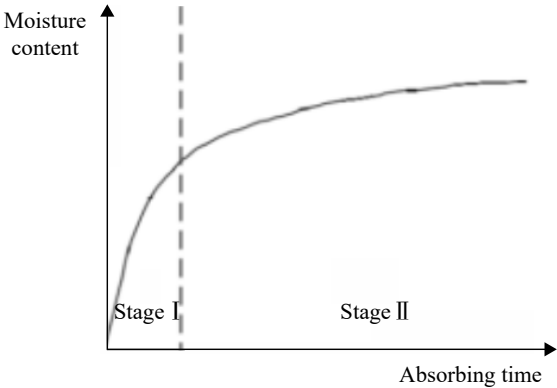


图 8 典型复合材料 Fick 吸湿扩散模型的吸湿规律曲线^[19-20]

Fig. 8 Moisture absorption curve of typical Fick model for combined material^[19-20]

料缝隙、缺陷等快速通道逐步达到吸湿平衡状态，导致吸湿速率不断减小，虽然前期吸湿过程中复合材料自身组成部分(纤维和基体)产生的亲水基团仍能进一步吸湿，但其吸湿能力远小于缝隙、缺陷等快速吸湿通道的吸湿能力，因此综合导致吸湿速率减小。

吸湿量 M 与吸湿时间 t 可通过式(3)表示^[21]，其中 M_t 为 t 时刻的吸湿量， M_∞ 为平衡吸湿量， K 是与扩散系数有关的常数， n 为与扩散类型有关的指数，若 $n=1/2$ ，则式(3)为 Fick 吸湿模型。

$$\frac{M_t}{M_\infty} = Kt^n \tag{3}$$

Fick 基于热传导的物理过程提出了物质扩散的公式如式(4)所示，式中 F 、 D 、 Z 和 C 分别为扩散速率、扩散系数、扩散方向和体积分数。实际情况中扩散物质会沿着体积分数高向体积分数低的方向进行扩散，因此式(4)右边包含负号，该式即为 Fick 第一模型。一模型。

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial Z} \tag{4}$$

若假设扩散系数为与 C 无关的常数，可得到式(5)：

$$\frac{\partial C_{(Z,t)}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_{(Z,t)}}{\partial^2 Z} \tag{5}$$

文献 [22-24] 给出了扩散系数 D 的表达式如式(6)，式中 h 为吸湿板材的厚度， M_{t_1} 、 M_{t_2} 分别表示 t_1 、 t_2 时刻试样吸湿量。

$$D = \pi \left(\frac{h}{4M_\infty} \right)^2 \left(\frac{M_{t_2} - M_{t_1}}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right) \tag{6}$$

对于沿平面法向的一维扩散, Fick 第一模型的边界条件如式(7)所示, 其中 C_0 、 C_∞ 分别为 0 时刻、平衡时刻的水分体积分数。

$$\begin{cases} C_{(z,0)} = C_0 \\ C_{(-h/2,t)} = C_{(h/2,t)} = C_\infty \end{cases} \quad (7)$$

解微分方程式(5), 得到式(8):

$$\frac{C-C_0}{C_\infty-C_0} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)^{-1} \sin \frac{(2n+1)Z\pi}{h} \exp \frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{h^2} \quad (8)$$

对上式 Z 从 $-h/2$ 到 $h/2$ 积分, 并令 $M_t = \int_{-h/2}^{h/2} C_{x,t} dt$, 可以得到式(9):

$$\frac{M_t - M_0}{M_\infty - M_0} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)^{-1} \exp \frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{h^2} \quad (9)$$

式中 $M_\infty = \int_{-h/2}^{h/2} C_{(x,t_\infty)} dt$, M_0 代表初始时刻的吸湿量。对于复合材料, Shen 和 Springer^[25] 给出了上式的近似表达如式(10)所示:

$$\frac{M_t - M_0}{M_\infty - M_0} = 1 - \exp \left[-7.3 \left(\frac{Dt}{h^2} \right)^{0.75} \right] \quad (10)$$

显然, 通过对图 5 和典型 Fick 吸湿规律曲线(图 8)的对比可知, 本文中的复合材料吸湿试验是符合 Fick 扩散模型的。但许多学者研究发现吸湿后期 Fick 模型预测数据均小于试验数据且预测差值越来越明显, 原因在于 Fick 模型假设试验件吸湿只沿厚度方向(平面法向)进行, 而忽略了从侧面进行的吸湿, 因此应用 Fick 模型进行预测的吸湿量通常会略小于试验值。

鉴于上述 Fick 模型的局限性, 基于 Fick 吸湿模型式(10)提出了改进 Fick 吸湿模型, 如式(11)所示, 其中 $0.01(2h/a + 2h/b)Dt/h^2$ 为修正项, 用于代表沿侧面进行的吸湿量, 式中 a 和 b 分别为吸湿板件的平面二维尺寸, 即为板件的长和宽, 其中 $2h/a$ 为沿长度方向侧边的贡献量, $2h/b$ 为沿宽度方向的贡献量。

$$\frac{M_t - M_0}{M_\infty - M_0} = 1 - \exp \left[-7.3 \left(\frac{Dt}{h^2} \right)^{0.75} \right] + 0.01 \left(\frac{2h}{a} + \frac{2h}{b} \right) \frac{Dt}{h^2} \quad (11)$$

而且考虑到加筋板包含有筋条和蒙皮的典型

特征, 导致在筋条和蒙皮连接部位的厚度与其他部位不一致, 因此不同厚度的部位在相同时间内达到的吸湿量并不相同。文献[15]提出了加筋板两阶段吸湿模型, 该模型存在 3 个假设: ① Fick 定律可以描述复合材料加筋板的吸湿行为; ② 吸湿过程中不考虑板件侧边的吸湿; ③ 加筋板较薄的区域首先达到吸湿平衡状态, 较厚的区域后达到平衡。本文基于该文献的假设③同时应用改进 Fick 吸湿模型将沿侧边吸湿量考虑在内, 提出了一种更为精确的加筋板吸湿两阶段模型。

吸湿试验件的横截面如图 9 所示, 其中蓝色区域在第 I 阶段首先达到吸湿平衡, 黄色矩形区域表示随后在第 II 阶段达到吸湿平衡。

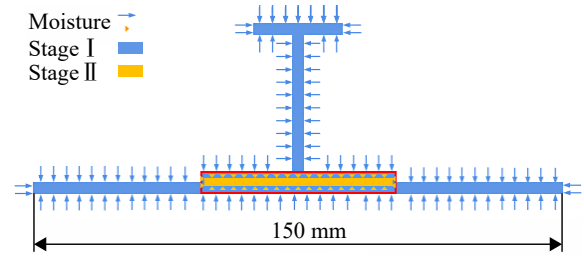


图 9 加筋板两阶段吸湿模型

Fig. 9 Two-stage moisture absorption model of stiffened panel

因此图 9 所示的吸湿过程可以等价为图 10 所示的分解过程, 其中在第 I 阶段内的吸湿又可分为 3 个部分, ①和③部分是相同的, 均可以认为有 4 个侧边(2 个长边和 2 个宽边)进行了吸湿, 但是②部分在长边上没有吸湿, 只有宽边进行了侧边吸湿, 这 3 个部分在后续计算中要加以区分。图 10 中第 I、II 阶段的各部位厚度相同, 根据筋条和蒙皮的几何尺寸, 第 I 阶段和第 II 阶段的分界点应如式(12)所示。以 1#加筋板试验件为例, $M_k=0.559\%$, 此时对应的吸湿时间约为 60 d, 因此在吸湿动力学曲线第 I、II 阶段的分界点为(60, 0.559%), 该分界点记为 (t_k, M_k) 。

$$M_k = \frac{150 + (45 - 2.75 \times 2) + 2.75}{150 + (45 - 2.75 \times 2) + 25 + 55} M_\infty \quad (12)$$

1) 第 I 阶段

在计算第 I 阶段的吸湿模型时, 认为①和③部分的两个长侧边和宽侧边均进行了吸湿, ②部分只在宽侧边进行了吸湿, 因此第 I 阶段的吸湿模型可以表示为式(13), 其中 D_I 表示第 I 阶段的扩散系数, a 、 b 、 c 、 h 、 w 分别为试验件蒙皮的长、蒙皮的宽、筋条的高、板件厚度、上凸缘的宽(如

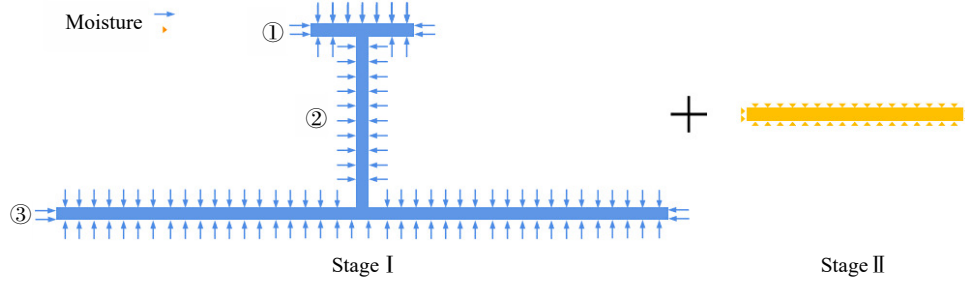


图10 两阶段吸湿模型的分解

Fig. 10 Decomposition of two-stage moisture absorption model

图2所示)。

$$M_1 = M_\infty \left\{ 1 - \exp \left[-7.3 \left(\frac{D_1 t}{h^2} \right)^{0.75} \right] \right\} + 0.01 \left[\left(\frac{2h}{a} + \frac{2h}{b} \right) + \frac{2h}{c} + \left(\frac{2h}{w} + \frac{2h}{a} \right) \right] \frac{D_1 t}{h^2} \quad 0 < t < t_k \quad (13)$$

2) 第Ⅱ阶段

此阶段内可认为该部位在两个长侧边和两个宽侧边均进行了吸湿, 吸湿模型可表达为式(14), 其中 D_2 表示第Ⅱ阶段扩散系数, v 为筋条下凸缘的宽(如图2所示)。

$$M_2 = M_k + (M_\infty - M_k) \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-7.3 \left(\frac{D_2 (t - t_k)}{h^2} \right)^{0.75} \right] \right\} + 0.01 \left(\frac{2h}{a} + \frac{2h}{v} \right) \frac{D_2 (t - t_k)}{h^2} \quad t_k < t < t_\infty \quad (14)$$

将该模型应用于本文1#试验件试验数据, 并与文献[15]的模型进行对比, 结果如图11所示。从图中可看出, 第Ⅰ阶段本文模型显然优于文献

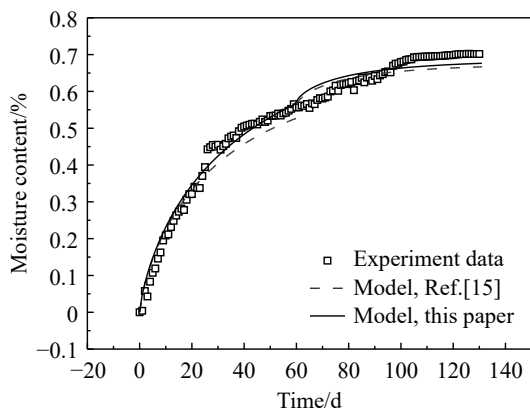


图11 本文模型和文献[15]模型与本文试验数据的对比

Fig. 11 Experimental data in this paper comparison between author's model and Ref. [15] model results

[15]模型, 对于第Ⅱ阶段, 直观上并不能明显分辨出两种模型的优劣, 为此将两种模型的残差绘于图12中, 从图中可看出, 无论是第Ⅰ阶段还是第Ⅱ阶段, 本文模型的残差较文献[15]模型的残差整体更靠近0轴, 即本文模型的预测值与试验值更接近。为了定量考察, 分别计算了第Ⅰ阶段、第Ⅱ阶段和全过程阶段中两种模型的残差平方和, 文献[15]模型第Ⅰ阶段、第Ⅱ阶段和全过程阶段的残差平方和分别为0.0743、0.0580和0.1322, 本文模型对应的残差平方和分别为0.0376、0.0547和0.0923, 因此文献[15]模型第Ⅰ阶段、第Ⅱ阶段和全过程阶段的残差平方和均大于本文模型的对值, 进一步说明了本文模型优于文献[15]模型。

为了进一步考察本小节提出的修正两阶段吸湿模型的有效性, 应用两种模型对文献[15]的数据进行分析, 该文献吸湿试验件材料为碳纤维环氧树脂基复合材料, 吸湿环境是70℃、85%RH。该文献第Ⅰ阶段和第Ⅱ阶段的吸湿分界点为(30, 0.7), 从图13中可看出, 本文模型在第Ⅰ阶段显

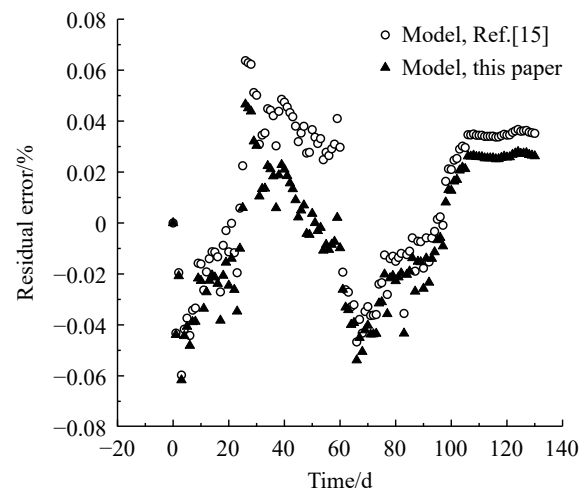


图12 本文模型和文献[15]模型与本文试验数据的残差对比

Fig. 12 Residual error comparison of the experimental data in this paper between author's model and Ref. [15] model results

然优于文献 [15] 模型; 同样将第 II 阶段两种模型的残差绘于图 14 中, 可以看出, 本文模型的残差整体较文献 [15] 模型更接近 0 轴, 文献 [15] 模型第 I 阶段、第 II 阶段和全过程阶段的残差平方和分别为 0.017 9、0.037 8 和 0.055 7, 本文模型对应的残差平方和分别为 0.010 4、0.025 7 和 0.036 1, 因此文献 [15] 模型第 I 阶段、第 II 阶段和全过程阶段的残差平方和均大于本文模型的对应值, 说明了本文模型较精确。

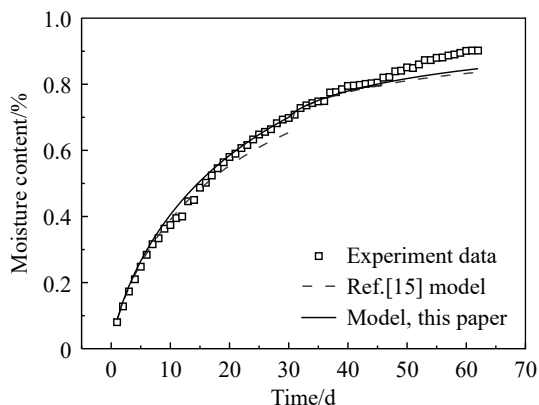


图 13 本文模型和文献 [15] 模型与文献 [15] 试验数据对比

Fig. 13 Experimental data in Ref. [15] comparison between author's model and Ref. [15] model results

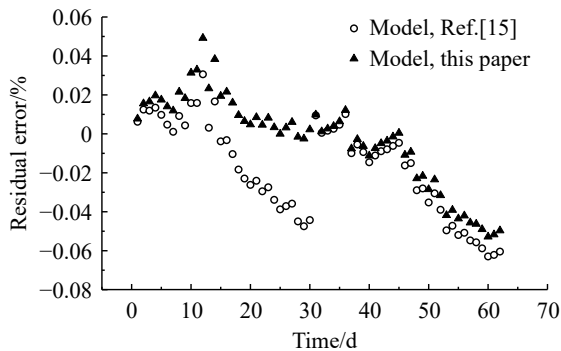


图 14 本文模型和文献 [15] 模型与文献 [15] 试验数据的残差对比

Fig. 14 Residual error comparison of the experimental data in Ref. [15] between author's model and Ref. [15] model

3 复材加筋板吸湿性能有限元仿真分析

本节建立了复合材料加筋板的吸湿有限元模型, 对吸湿过程中的水分扩散及分布规律进行了模拟。

3.1 建立有限元模型

应用 ABAQUS 的质量扩散模块 (mass diffusion) 对加筋板的吸湿过程进行模拟。质量扩散

是指一种物质在另一种物质中的瞬态或者稳态扩散过程, 可用于模拟受温度梯度、湿度梯度、体积分数梯度和压力梯度等驱动的质量扩散, 模拟中主要关心的变量是体积分数。

依据加筋板吸湿试验件的几何尺寸建立有限元几何模型, 单元类型为热传导单元 DC3D8 单元, 在试验件各表面 (包括侧面) 赋予边界条件, 即饱和吸湿量为 0.7%, 共计算 5 000 h 的吸湿过程。

3.2 有限元结果分析

不同吸湿时间下加筋板中部横截面 (长度为 100 mm 处截面) 的吸湿量分布如图 15 所示。

在吸湿第 2 d 时 (图 15(a)), 试验件各表面迅速达到饱和吸湿量 0.7%, 原因在于这些表面都与水分直接接触, 能够十分快速地达到吸湿饱和; 在吸湿第 16 d 时 (图 15(b)), 试验件各部分进一步吸湿, 但是可以看出各部分并没有达到完全的吸湿饱和状态; 在吸湿第 60 d 时 (图 15(c)), 加筋

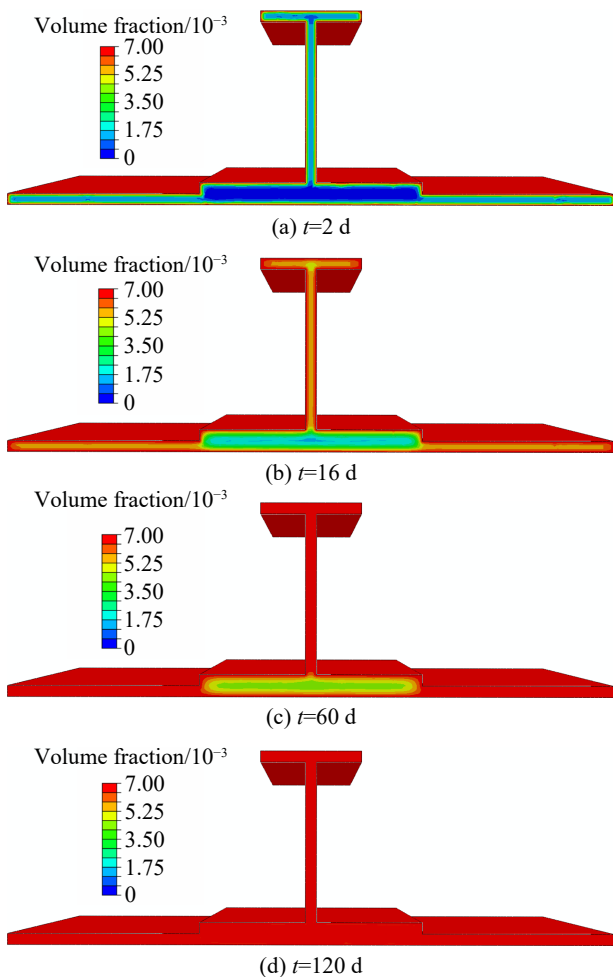


图 15 不同吸湿时间对应的中截面吸湿量分布

Fig. 15 Moisture absorption distribution on middle section corresponding to different moisture absorption times

板薄板区域(图9中的蓝色区域)均基本达到了吸湿平衡,而厚板区域(图9中的红色虚线框区域)还未达到完全的吸湿饱和状态;在吸湿第120 d时(图15(d)),加筋板整个截面均达到了吸湿饱和状态。

图15中所示各时间点薄板区域和厚板区域沿厚度方向吸湿量的分布如图16所示。对于薄板区域,初始阶段外表面的吸湿量最大,沿厚度向中部吸湿量逐步减小,随着吸湿时间的增加,内部的吸湿量逐步增大并直至平衡,对于厚板区域也是相似的情况。从图16(a)中可以看出,吸湿60 d时,薄板区域基本都达到了饱和吸湿量0.7%,此后,在吸湿60~120 d内,薄板吸湿量基本不发生变化,因此吸湿60 d和120 d时的吸湿量变化曲线在图中存在大部分重合,但在筋条与蒙皮相连的较厚区域仍存在轻微的吸湿现象,导致两条曲线有细微差异。由图16(b)可以发现,

吸湿60 d时厚板区域仍未达到饱和吸湿状态,吸湿60~120 d时间内厚板区域吸湿量仍有很大变化,直至吸湿120 d时达到了饱和吸湿状态。因此,依上述分析可知,当整个加筋板达到吸湿平衡前,其不同部位沿厚度方向的吸湿量是不同的。

4 结论与展望

本文首先开展了复合材料加筋板吸湿性能试验研究,分析了加筋板湿热环境下的吸湿规律;随后,创新性提出了考虑侧边吸湿效应的修正两阶段吸湿模型,与试验结果良好吻合,且与文献模型对比具有更高的预测精度;最后通过有限元仿真形象观察了加筋板内部吸湿规律,验证了模型理论的可靠性。

1) 1#、2#和3#试验件饱和吸湿量分别为0.702%、0.696%和0.687%,吸湿过程可明显分为两个阶段:前期(0~30 d)的快速吸湿阶段和后期(30 d后)吸湿速率逐渐放缓直至平衡阶段。

2) 修正两阶段吸湿模型的计算结果可与试验结果良好吻合,该模型的残差整体较文献[15]模型更接近0轴,精确度更高。

3) 有限元仿真结果表明,在加筋板的吸湿过程中,水分从加筋板外表面向内扩散,薄板区域首先达到吸湿平衡,经过一段时间后,厚板区域也达到了吸湿平衡状态。

4) 复合材料加筋板在不同吸湿时间点的吸湿量沿厚度方向的分布规律为:与水分接触的表面迅速达到吸湿饱和,沿厚度向中部吸湿量逐步减小,随着吸湿时间的增加,内部吸湿量逐步增大并直至平衡,在整个加筋板达到吸湿平衡前,其不同部位沿厚度方向的吸湿量不同。

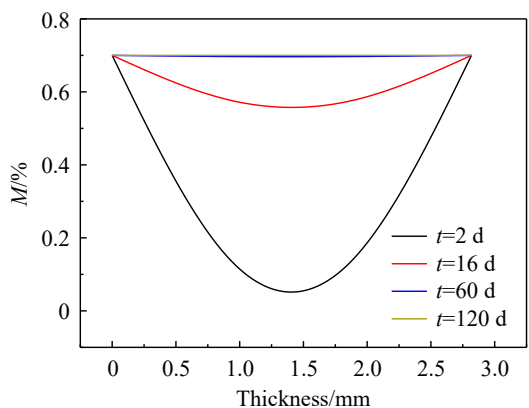
另外文中的工作仍存在一些不足和值得继续探究的部分,具体如下:

1) 试验仅在一组条件下进行,后期可开展不同温度、湿度条件下的吸湿试验,进一步探究不同环境对吸湿规律的影响。

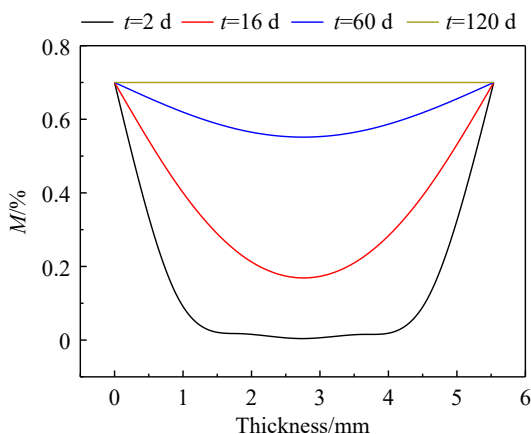
2) 复合材料吸湿前后的力学性能变化是直接影响结构安全性和可靠性的重要因素,后期可开展相关工作。

参考文献:

- [1] 益小苏. 航空复合材料科学与技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- [2] 贾振元, 肖军, 湛利华, 等. 大型航空复合材料承力构件制造关键技术[J]. 中国基础科学, 2019, 21(2): 20-27.



(a) 薄板区域沿厚度方向的吸湿量



(b) 厚板区域沿厚度方向的吸湿量

图16 不同吸湿时间薄板区域和厚板区域吸湿量沿厚度方向的分布

Fig. 16 Distribution of moisture absorption along thickness direction in thin panel and thick panel with different moisture absorption times

- JIA Zhenyuan, XIAO Jun, ZHAN Lihua, et al. Research of large aviation and loading-bearing composite components manufacturing[J]. *China Basic Science*, 2019, 21(2): 20-27. (in Chinese)
- [3] 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 Song, JIA Yaoxiong, XU Liang, et al. Effect of hygrothermal environment on mechanical properties of T800 carbon fiber/epoxy resin composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2021, 49(10): 138-143. (in Chinese)
- [4] 杨乃宾, 倪先平. 直升机复合材料结构设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [5] 唐见茂. 碳纤维树脂基复合材料发展现状及前景展望[J]. *航天器环境工程*, 2010, 27(3): 269-280.
- TANG Jianmao. Review of studies of carbon fiber resin matrix composites[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, 27(3): 269-280. (in Chinese)
- [6] 张纪奎, 酆正能, 程小全, 等. 复合材料整体结构在大型民机上的应用[J]. *航空制造技术*, 2007, 9(3): 38-44.
- ZHANG Jikui, LI Zhengneng, CHENG Xiaoquan, et al. Application of the composite material overall structure in large civil aircraft[J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2007, 9(3): 38-44. (in Chinese)
- [7] FAGGIANI A, FALZON B G. Predicting low-velocity impact damage on a stiffened composite panel[J]. *Composites: Part A*, 2010, 41: 737-749.
- [8] KIM H W, GRAYSON M A, NAIRN J A. Effect of hygrothermal aging on the microcracking properties of some carbon fiber/polyimide laminates[J]. *Advanced Composite Letters*, 1995, 4: 185-192.
- [9] BROWNING C E. The mechanisms of elevated temperature property losses in high performance structural epoxy resin matrix materials after exposures to high humidity environments[J]. *Polymer Engineering and Science*, 1978, 18: 16-25.
- [10] 杜永, 马玉娥. 湿热环境下纤维增强树脂基复合材料疲劳性能研究进展[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(2): 431-445.
- DU Yong, MA Yu'e. Fatigue performance of fiber reinforced polymer composites under hygrothermal environment: a review[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(2): 431-445. (in Chinese)
- [11] 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 Haiyan, WU Yuhang, SHI Huiru. 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. (in Chinese)
- [12] 吴以婷, 葛东云, 李辰. 湿热环境下Carbon/Epoxy复合材料层合板动态压缩性能[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(2): 259-264.
- WU Yiting, GE Dongyun, LI Chen. Dynamic compressive properties of Carbon/Epoxy composite laminates under hygrothermal environment[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(2): 259-264. (in Chinese)
- [13] 牛一凡, 李璋琪, 朱晓峰. 全湿热场下碳纤维/环氧树脂复合材料层间剪切强度[J]. *高分子材料科学与工程*, 2021, 37(4): 113-120.
- NIU Yifan, LI Zhangqi, ZHU Xiaofeng. Interlaminar shear strength of carbon fiber/epoxy composites under hygrothermal conditions[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2021, 37(4): 113-120. (in Chinese)
- [14] 回丽, 王勇刚, 许良, 等. 考虑水浸温度影响的复合材料吸湿动力学模型[J]. *材料工程*, 2016, 44(11): 83-87.
- HUI Li, WANG Yonggang, XU Liang, et al. Moisture absorption model of composites considering water temperature effect[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2016, 44(11): 83-87. (in Chinese)
- [15] ZHANG Tiejun, LI Shulin, CHANG Fei, et al. An experimental and numerical analysis for stiffened composite panel subjected to shear loading in hygrothermal environment[J]. *Composite Structures*, 2016, 138: 107-115.
- [16] FENG Yu, HE Yuting, AN Tao, et al. Effect of hygrothermal condition on buckling and post-buckling performance of CCF300/5228A aero composite stiffened panel under axial compression[J]. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 2015, 34(12): 989-999.
- [17] 张先航, 李曙林, 常飞, 等. BA9916-II/CCF300复合材料加筋板吸湿特性[J]. *航空材料学报*, 2017, 37(5): 63-69.
- ZHANG Xianhang, LI Shulin, CHANG Fei, et al. BA9916-II/CCF300 composite stiffened plate hygroscopic characteristics[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2017, 37(5): 63-69. (in Chinese)
- [18] ASTM. Standard test method for moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials: ASTM D5229/D5229M [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2004: 1-20.
- [19] 赵晨, 陈跃良, 刘旭. 湿热条件下飞机聚合物基复合材料界面问题研究进展[J]. *装备环境工程*, 2012, 9(5): 62-67.
- ZHAO Chen, CHEN Yueliang, LIU Xu. Research progress of interface of polymer matrix composites for aircraft in hot and humid environment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2012, 9(5): 62-67. (in Chinese)
- [20] 高坤, 史汉桥, 孙宝岗, 等. 湿热老化对玻璃纤维/环氧树脂复合材料性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(6): 1147-1152.
- GAO Kun, SHI Hanqiao, SUN Baogang, et al. Effects of hydrothermal aging on properties of glass fiber/epoxy composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(6): 1147-1152. (in Chinese)
- [21] 张树永, 罗小雯, 李善君, 等. 环氧树脂的吸水研究[J]. *化学通报*, 1997, 64(8): 31-35.
- ZHANG Shuyong, LUO Xiaowen, LI Shanjun, et al. Study on water absorption of epoxy resin[J]. *Chemistry*, 1997, 64(8): 31-35. (in Chinese)
- [22] 王红霞, 万怡灶, 王玉林. 玻璃纤维增强光固化树脂基复合材料吸湿性能的研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2005, 32(1): 33-36.
- WANG Hongxia, WAN Yizao, WANG Yulin. Study on moisture absorption of fiber reinforced light cured resin based composites[J]. *Composites Science and Engineering*, 2005, 32(1): 33-36. (in Chinese)
- [23] ADAMS R D, SINGH M M. The dynamic properties of fibre-reinforced polymers exposed to hot, wet conditions[J]. *Composites Science and Technology*, 1996, 56(8): 977-997.
- [24] ZHOU Jiming, LUCAS J P. Hygrothermal effects of epoxy resin: Part I the nature of water in epoxy[J]. *Polymer*, 1999, 40(20): 5505-5512.
- [25] SHEN Chihung, SPRINGER G S. Moisture absorption and desorption of composite materials[J]. *Journal of Composite Materials*, 1976, 10(1): 2-20.