

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.03.055

# 湿热环境对复合材料结构承载能力影响 试验研究

郑浩\*, 赵占文

中航工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

**摘要:** 针对复合材料结构设计时需考虑湿热环境的影响这一问题, 分别进行了室温和湿热环境下的标准试样级许用值试验及加筋壁板典型细节结构轴压和剪切载荷试验, 给出了许用值试验的环境补偿因子及加筋壁板的破坏载荷。试验结果表明, 标准试样级试验得到的设计值较为保守。因此, 在进行复合材料结构设计时还应综合考虑典型细节试验的结果。

**关键词:** 复合材料; 加筋壁板; 湿热环境; 许用值

中图分类号: V257 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2017) 03-0055-04

为了满足现代飞机的总体设计要求, 减轻结构重量, 提高飞机性能, 延长飞机的使用寿命, 越来越多的复合材料应用于飞机结构。然而, 飞机的使用环境复杂, 特别是湿热环境对于飞机复合材料结构的影响是设计中必须考虑的问题<sup>[1-5]</sup>。目前, 国外在进行复合材料结构设计时, 其许用值通常采用元件级、细节级试验的结果, 而国内在进行复合材料结构设计时, 通常采用标准试样——许用值试验结果, 没有对元件级、细节级的试验结果进行研究。

本文设计了复合材料许用值试验和加筋壁板试验, 并分别进行室温和湿热两种环境试验。通过试验分析湿热环境对复合材料许用值及加筋壁板承载能力的影响, 以期能够得到合理的环境影响系数, 更好地发挥复合材料的优势。

## 1 试验件及试验方法

### 1.1 许用值试验

许用值试验采用标准试验件及试验方法进行试验, 试验件的铺层为复材结构的典型铺层, 铺层比例确定为 A 类: 30/60/10, B 类: 40/50/10, C 类: 50/40/10 三种类型。试验件分为开孔拉伸、开孔压缩、冲击后压缩、连接件、面内剪切、平板压缩、平板拉伸、层压板充填孔共 8 种类型。其中, 开孔后压缩试验、连接件试验、面内剪切试验、平板压缩试验、

平板拉伸试验及层压板充填孔试验分别进行了室温及湿热环境试验。

湿热试验开始前, 将试验件放置在浸泡箱 (浸泡箱中的蒸馏水温度要求为 70℃) 的水蒸汽中进行平衡吸湿预处理, 每两天对试验件进行称重, 直到试验件的吸湿量符合试验标准要求后吸湿结束, 之后进行湿热力学性能试验。

### 1.2 加筋壁板试验

加筋壁板试验件铺层及参数均取自实际结构。试验件选取 4 根长桁 (4 个壁板典型剖面)、1 个典型肋距试验段。试验件考核区在整个试验过程中处于简支状态。复合材料加筋壁板轴压及剪切试验件的试验件形式如图 1 所示。湿热环境轴压静力试验首先要进行试验件在环境箱湿热环境下的吸湿, 直到吸湿平衡, 再进行轴压静力试验。吸湿试验在高低温交变湿热试验箱中进行, 湿热试验箱的温度为 70℃, 相对湿度为 85%, 将试验件与伴随件一起放置于试验箱中进行吸湿, 以 1 天为时间间隔对伴随件进行称重, 以伴随件达到吸湿平衡为准, 当伴随件达到吸湿平衡时认为试验件也达到吸湿平衡。

为了达到环境试验的目的, 试验采用环境箱进行试验。环境箱的温度为 70℃, 相对湿度为 85%, 试验加载过程与室温轴压静力试验的过程完全相同。

收稿日期: 2016-08-31; 退修日期: 2016-11-12; 录用日期: 2016-11-15

\* 通讯作者. Tel.: 029-86832903 E-mail: 10298451@qq.com

引用格式: ZHENG Jie, ZHAO Zhanwen. Experimental research on the influence of hygrothermal environment on compressive carrying capacity of composite stiffened plates [J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (03): 55-58. 郑浩, 赵占文. 湿热环境对复合材料结构承载能力影响试验研究 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (03): 55-58.

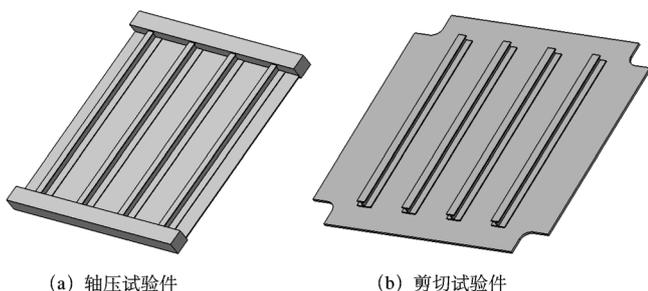


图1 试验件结构形式示意图

Fig.1 Sketch of sample structure

## 2 试验结果及分析

### 2.1 许用值试验结果

文中的环境补偿因子是根据室温及湿热两种试验环境下的试验结果的典型值进行对比得到的,试验结果的典型值及环境补偿因子如表1所示。从表1中的数据可以发现,除连接试验外,其他各类试验的环境补偿因子均大于1.15。

表1 许用值试验的典型值及环境补偿因子

Table 1 The typical value and environmental compensation factor for allowable value test

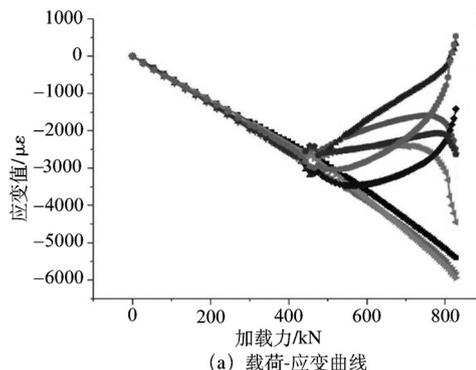
| 试验类型   | 铺层 | 室温强度典型值 / MPa | 湿热强度典型值 / MPa | 环境补偿因子 |
|--------|----|---------------|---------------|--------|
| 开孔压缩试验 | A  | 383.6         | 285.0         | 1.346  |
|        | B  | 436.5         | 305.8         | 1.427  |
|        | C  | 516.9         | 364.7         | 1.416  |
| 平板拉伸试验 | A  | 825.6         | 634.2         | 1.302  |
|        | B  | 1040.5        | 752.3         | 1.383  |
|        | C  | 1225.1        | 720.2         | 1.701  |
| 平板压缩试验 | A  | 674.7         | 410.6         | 1.643  |
|        | B  | 811.3         | 470.4         | 1.725  |
|        | C  | 793.8         | 595.5         | 1.333  |
| 面内剪切试验 | A  | 363.2         | 256.6         | 1.416  |
|        | B  | 339.1         | 248.2         | 1.366  |
|        | C  | 319.3         | 237.0         | 1.348  |
| 充填孔试验  | A  | 491.9         | 412.1         | 1.193  |
|        | B  | 551.9         | 452.5         | 1.220  |
|        | C  | 549.9         | 458.5         | 1.199  |
| 连接件试验  | A  | 665.3         | 656.1         | 1.014  |
|        | B  | 657.0         | 638.4         | 1.029  |
|        | C  | 634.8         | 568.8         | 1.116  |

### 2.2 加筋壁板试验结果

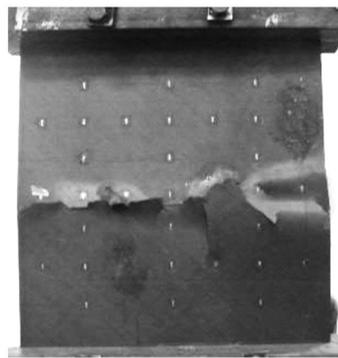
加筋壁板轴压及剪切试验各进行了6件试验,每种试验在室温及湿热环境下各3件。

#### (1) 轴压试验

室温及湿热环境下轴压试验件典型载荷-应变曲线及破坏模式分别如图2、图3所示。可以看出,初始阶段,试验件在两种环境下的应变值均呈线性变化,说明在该载荷范围内试验件整体均匀受压,随着试验载荷的不断增大,蒙皮上的应变出现明显的分叉或拐折,但此时筋条没有失稳且继续承载,当加载至破坏载荷时,试验件发生破坏,主要为蒙皮与长桁的折断,断裂部位集中在试验件中段。



(a) 载荷-应变曲线



(b) 破坏模式

图2 室温环境下试验件的载荷-应变曲线及破坏模式

Fig.2 The load-strain curve and failure characteristics for sample at indoor temperature

#### (2) 剪切试验

室温及湿热环境下剪切试验件典型载荷-应变曲线及破坏模式分别如图4、图5所示。从中可以看出,两种环境下试验件的载荷-应变曲线及破坏模式相似,在整个加载过程中,载荷-应变曲线基本呈线性增加,试验件的主要破坏模式均为蒙皮的撕裂、鼓包,同时伴有不同程度的筋条脱粘。

室温及湿热环境下各试验件的破坏载荷如表2所示。从表2中的数据可知,湿热环境下加筋壁板的破坏载荷较室温的下降较少,轴压试验湿热环境下平均破坏载荷较室温环境下平均破坏载荷下降了6.1%,剪切试验湿热环境下平均破坏载荷较室温环境下平均破坏载荷下降了5.4%。

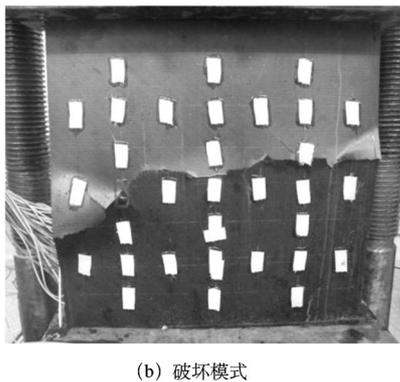
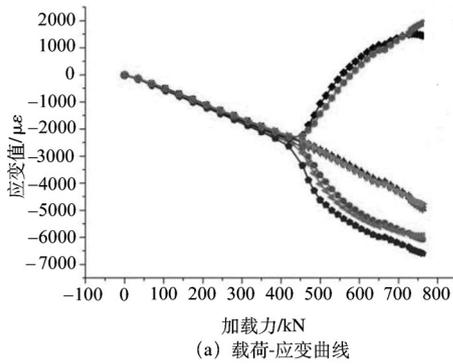


图3 湿热环境下试验件的载荷-应变曲线及破坏模式  
Fig.3 The load-strain curve and failure characteristics for sample in hygrothermal environment

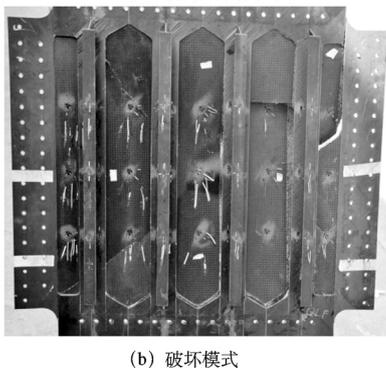
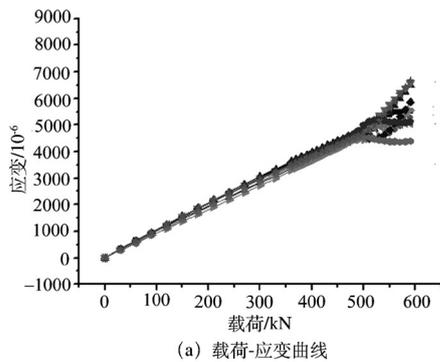


图4 室温剪切试验载荷-应变曲线及破坏模式  
Fig.4 The load-strain curve and failure characteristics for shear testing at indoor temperature

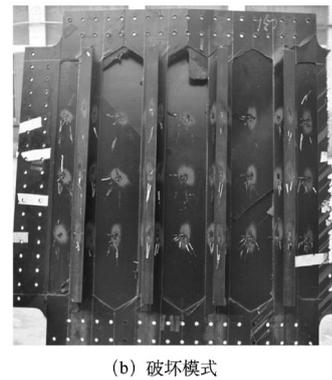
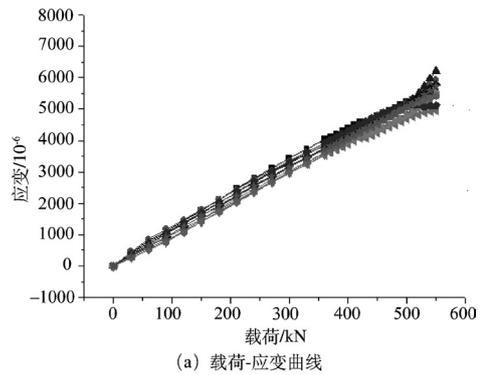


图5 湿热环境剪切静力试验载荷-应变曲线及破坏模式  
Fig.5 The load-strain curve and failure characteristics for shear static testing in hygrothermal environment

表2 试验件的破坏载荷结果  
Table 2 The failure load results of sample

| 试验环境 | 平均破坏载荷 /kN |        |
|------|------------|--------|
|      | 轴压试验       | 剪切试验   |
| 室温   | 808.7      | 590.00 |
| 湿热   | 761.5      | 558.00 |

### 2.3 试验结果分析

从以上两类试验可知,湿热环境下各试验件的破坏载荷均小于室温环境,湿热环境对复合材料的影响较为明显。但从试验结果来看,许用值试验得到的环境补偿因子较大,若以此为设计指标则相对保守。而加筋壁板试验由于试验件更加接近真实结构,得到的环境补偿因子较小,若以此为设计指标则更能发挥复合材料的优势,减轻结构的重量。因此,在进行初步设计时,由于试验研究的内容较少,可先采用许用值试验结果进行设计,使结构大体符合设计要求,而在详细设计阶段则应采用典型细节试验件得到更为详细准确的影响关系,即确保结构的完整性,又能够减轻结构重量<sup>[6]</sup>。

### 3 结论

复合材料结构设计时采用许用值试验得到的环境因子大于 1.15,而文中通过研究得到湿热环境下加筋壁板结构的

轴压承载能力相较于室温环境下结构的轴压承载能力降低约为 6.1%，剪切承载能力相较于室温环境下结构的剪切承载能力降低约为 5.4%，这表明试样级试验得到的设计值较为保守。为了充分发挥复合材料结构的承载潜力，有必要多开展一些结构细节环境承载能力试验。由于本文所研究的典型细节类试验有限，不能完全总结出所适用的环境补偿因子，因此，在今后的工作中将继续在这方面进行研究。 **AST**

### 参考文献

- [1] 尚柏林, 张亚豪, 谢紫龙, 等. 受冲击损伤复合材料加筋壁板的抗剪切承载能力 [J]. 材料科学与工程学报, 2014, 32 (3) : 461-464.  
SHANG Bolin, ZHANG Yahao, XIE Zilong, et al. Shear carrying capacity of composite material stiffened wall with impact damage [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2014, 32 (3) : 461-464. (in Chinese)
- [2] 尹俊杰, 常飞, 李曙林, 等. 损伤位置对复合材料加筋壁板剪切承载能力的影响 [J]. 机械工程材料, 2013, 37 (7) : 68-71.  
YIN Junjie, CHANG Fei, LI Shulin, et al. Effect of damage locations on shear carrying capacity of composite material stiffened wall [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2013, 37 (7) : 68-71. (in Chinese)
- [3] YANG Xu, SHEN Zhen, YAN Ying. New methodology for evaluating toughness of composite laminates investigation of damage resistance [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2003, 16 (2) : 73-79.
- [4] 崔海坡, 温卫东, 徐颖. 复合材料板冲击损伤及剩余拉伸强度试验 [J]. 航空动力学报, 2007, 22 (10) : 140-146.  
CUI Haipo, WEN Weidong, XU Ying, et al. Experimental research on impact damage and residual tensile strength of composite laminates [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22 (10) : 140-146. (in Chinese)
- [5] 常飞, 尹俊杰, 李曙林, 等. 损伤面积对加筋壁板剪切承载能力的影响 [J]. 机械工程材料, 2013, 37 (6) : 14-21.  
CHANG Fei, YIN Junjie, LI Shulin, et al. Effect of damage area on shear carrying capacity of composite material stiffened wall [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2013, 37 (6) : 14-21. (in Chinese)
- [6] 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) : 385-392.  
SHEN Zhen. Design allowable of composite aircraft structures and their determination principles [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998, 19 (4) : 385-392. (in Chinese)

### 作者简介

郑洁 (1985—) 女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 复合材料结构强度设计。

Tel: 029-86832903 E-mail: 10298451@qq.com

## Experimental Research on the Influence of Hygrothermal Environment on Compressive Carrying Capacity of Composite Stiffened Plates

ZHENG Jie\*, ZHAO Zhanwen

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

**Abstract:** The influence of hygrothermal environment on composite plates must be considered when design composite structure. In this paper, some standard sample tests, typical detail tests and shear load tests were carried out in the indoor temperature and hygrothermal environment. Allowable value environment compensation factor and failure load of stiffened plate were given. The results indicated that the design value obtained from standard sample tests were conservation. Thus the typical detail test results must be considered as well when designing composite structure.

**Key Words:** composite; stiffened plate; hygrothermal environment; allowable value

Received: 2016-08-31; Revised: 2016-11-12; Accepted: 2016-11-15

\*Corresponding author. Tel. :029-86832903 E-mail: 10298451@qq.com