

理论与实验研究

湿热环境对 CCF300 复合材料层合板的载荷放大系数影响

刘旭¹, 雷园玲², 陈跃良¹, 霍武军¹

(1. 海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041; 2. 南昌航空大学, 南昌 330063)

摘要: 目的 研究湿热环境对 CCF300 复合材料层合板载荷放大系数的影响。方法 以铺层方式为 $[45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 2/45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 0^\circ]_{2s}$ 的 CCF300/5228A 复合材料层合板为研究对象, 对其进行恒定环境与常幅疲劳载荷的非共同作用实验, 采用改进的联合威布尔分布分析复合材料的疲劳寿命分散性, 并运用 MATLAB 软件编写程序, 分别计算得到其部件的载荷放大系数。结果 在研究范围内, 随着试验环境中温湿度的增加, 复合材料的形状参数单调递减, 而载荷放大系数单调递增。结论 载荷放大效果并不明显, 不能很好地加速该复合材料层合板的疲劳寿命试验, 说明湿热环境导致复合材料力学性能下降, 但反映到载荷放大系数的影响不大。

关键词: 耐久性; 复合材料层合板; 联合威布尔分布; 载荷放大系数; 湿热环境

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.04.018

中图分类号: TJ01; TB332 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)04-0095-05

Effect of Hydrothermal Environment on Load Enhancement Factor of CCF300 Composite Laminates

LIU Xu¹, LEI Yuan-ling^{1,2}, CHEN Yue-liang¹, HUO Wu-jun¹

(1. Qingdao Branch, Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao 266041;

2. Nanchang Aeronautical University, Nanchang 330063)

ABSTRACT: **Objective** To study the effect of hydrothermal environment on load enhancement factor of CCF300 composite laminates. **Methods** The study focused on the CCF300/5228A composite laminates with the stacking sequence of $[45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 2/45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 0^\circ]_{2s}$. The non-coupling experiment of constant environment and constant-amplitude fatigue loading was conducted, the dispersion of the fatigue life of the composite material was analyzed by modified joint Weibull distribution, and the MATLAB software was used to develop a program to calculate the load enhancement factor of the part. **Results** The results showed that the shape parameter of composite materials had monotone decrease when the humidity increased, accordingly the load enhancement factor also

收稿日期: 2015-04-05; 修订日期: 2015-05-22

Received: 2015-04-05; Revised: 2015-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(51375490)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51375490)

作者简介: 刘旭(1985—),男,博士研究生,主要研究方向为碳纤维复合材料海洋环境适应性。

Biography: LIU Xu(1985—), Male, Doctor graduate student, Research focus: marine environment adaptability of carbon fiber composite materials.

increased. **Conclusion** It showed that under hydrothermal environment, the load enhancement effect was not sufficient to accelerate fatigue of the composite laminates in the fatigue life test, indicating that the mechanical properties decreased, however, the load enhancement factor had no obvious change.

KEY WORDS: durability; composite laminates; joint Weibull distribution; load enhancement factor; hydrothermal environment

复合材料的疲劳分散性比金属材料大,但复合材料的损伤形成和扩展(疲劳)发生模式复杂且极难分析模拟。影响复合材料分散性的主要环境因子包括:温度、湿度、光照、局部环境^[1](含化学或微生物因素)等。关于湿热环境对于材料腐蚀老化的影响,国内外已经作了大量的研究工作^[2-3],研究结果表明:在高温潮湿环境中,复合材料基体由于吸湿效应使得性能降低。加上树脂基体和增强材料由于各组相吸收水分膨胀比的差异产生内部应力,破坏内部力学平衡。随着水分渗入的增多,容易堆积在内部层间缺陷中,造成局部应力集中,为裂纹的形成创造了良好条件,破坏材料整体性能,使得各项强度性能指标下降。为了能够更加安全、有效地设计复合材料结构,必须对湿热环境下的复合材料疲劳行为进行研究。

为了控制疲劳分散性的影响和减少复合材料结构部件试验的时间和成本,且保证复合材料结构的疲劳验证在统计上有效,目前最常用的试验方法是载荷放大系数法^[4-7]。载荷放大系数法是从剩余强度角度考虑处理寿命问题,将给定载荷(谱)下的结构寿命试验,转化为给定B基准寿命下的结构剩余强度验证试验^[8]。这种方法是将疲劳试验载荷放大某一倍数后用于验证试验,从而可在较短的试验周期内,保证结构寿命具有同样的B基准可靠性。载荷谱中的载荷放大(包括分散性和环境影响)后不能超过设计限制载荷,而且一般谱中最高一级载荷不应放大。

国产碳纤维 CCF300 是一种很有应用前景的航空、航天结构复合材料,目前已在某型运输机平尾得到应用^[9]。文中对 CCF300/5228A 复合材料层合板进行了疲劳试验,由于条件限制,采用的是恒定环境与常幅疲劳载荷的非共同作用实验,即将试件作环境处理后再施加常幅疲劳载荷(现行规定方法),并采用改进的联合威布尔分布分别计算其复合材料的载荷放大系数 LEF (Load enhancement factor)^[10],通过试验验证达到减少复合材料部件试验时间和成本的目的。此外,通过对比分析其载荷放大系数,得出湿热环境对复合材料载荷放大系数的影响。

1 CCF300 的疲劳试验及验证

1.1 试验件

试验的研究对象是某型运输机平尾的复合材料 CCF300/5008A,其铺层方式为 $[45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 0^\circ]_{2s}$ 。试验件的形状和设计几何尺寸如图1、图2所示。所有试验件的加工制造均由中航工业 625 所完成。试验件长度 L 为 230 mm,厚度 t 为 2.4 mm,宽度 b 为 38 mm,加强片长度 a 为 50 mm。



图1 试验件实物

Fig.1 Picture of test sample

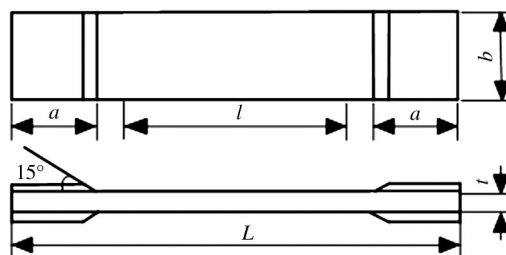


图2 试验件的形状尺寸

Fig.2 Shape and size of test sample

1.2 试验环境

环境试验分室温和湿热两种情况。室温的温度为 $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$,相对湿度为 $(50 \pm 15)\%$ 。湿热环境试验在 SHHW21.600A II 型电热恒温水箱中进行,如图3所示。按照环境暴露试验要求,连续熏蒸并每日称量观察吸水状况,湿态维持至试验件吸水量达到平衡为止。吸水量平衡标准是在 24~48 h 间隔内称量,试验件质量增量小于 0.01% 或时间-吸水曲线斜率接近 0,认为达到平衡吸湿量^[11]。在湿热环境箱中设定两组试验环境:温度为 70°C ,湿度为 85%;温度为 90°C ,相对

湿度为90%。



图3 湿热环境箱
Fig.3 Hot and humid environmental box

1.3 试验设备和试验数据

经试验环境处理后,根据美国材料试验学会试验标准的ASTM D 3039试验方法,在MTS810疲劳试验机上进行静拉伸和疲劳试验,如图4所示。静拉伸试验的夹紧力为20 MPa,加载速率取0.05 mm/min,得到平均静拉伸强度后再进行试验件的疲劳试验。一般情况下,疲劳载荷试验都要进行3~5个不同应力水平的试验,其中作用最高和最低应力水平的循环次数最好在103~106左右,而中间的应力水平则需要根据不同的试验要求自行选取。根据复合材料分散性的 大小和可以使用的试验件数以及试验持续时间等因素,选取不同应力水平的试验件数量。基于复合材料层合板破坏形式多样化的情况,通常需要取4~10个试验件。由于试验条件的限制,疲劳试验采用的是恒定环境与常幅疲劳载荷的非共同作用试验,即将试件作环境处理后再施加常幅疲劳载荷(现行规定方法)。



图4 MTS810疲劳试验机和测试系统
Fig.4 The MTS810 servohydraulic test frame

文中以湿热环境(温度为70 ℃,湿度为85%)处理后试验件的求解过程为例,详细说明利用改进的联合威布尔分布计算其复合材料载荷放大系数的过程。

得到相应的静拉伸试验结果和疲劳试验数据分别见表1和表2。

表1 试验件湿热环境的静拉伸试验数据
Table 1 Hot and humid environment data of test pieces for static tensile test

试验件 编号	宽度 <i>b</i> / mm	厚度 <i>t</i> / mm	静拉伸强 度/MPa	平均静拉伸 强度/MPa
S1	24.96	2.42	767.68	746.63
S2	25.00	2.40	788.86	
S3	24.90	2.38	683.36	

表2 试验件湿热环境的疲劳试验数据
Table 2 Data of hot and humid environmental fatigue test of test pieces

组号 (<i>i</i>)	试验 件号	循环应力 /MPa	循环 总数	剩余强度 (ksi)	试验件数		
					总数 (<i>n_i</i>)	未失效数 (<i>n_{ri}</i>)	失效数 (<i>n_{fi}</i>)
1	1	522.64	106	82.68	5	5	0
	2	522.64	106	79.50			
	3	522.64	106	85.36			
	4	522.64	106	90.36			
	5	522.64	106	84.78			
2	6	559.97	106	63.18	5	5	0
	7	559.97	106	60.06			
	8	559.97	106	61.58			
	9	559.97	106	61.00			
	10	559.97	106	60.23			
3	11	597.30	493 004	—	6	4	2
	12	597.30	976 504	—			
	13	597.30	106	51.95			
	14	597.30	106	52.06			
	15	597.30	106	52.64			
4	16	597.30	106	50.51	5	0	5
	17	643.64	44 696	—			
	18	643.64	12 427	—			
	19	643.64	20 437	—			
	20	643.64	49 832	—			
5	21	643.64	41 694	—	4	0	4
	22	671.97	14	—			
	23	671.97	31	—			
	24	671.97	25	—			
	25	671.97	16	—			

1.4 试验数据分析

1.4.1 联合威布尔分布参数的确定

由文献[10]可知,可采用式(1),(2)改进的联合威

布尔分布方程分别计算疲劳寿命的形状参数(α_L)和剩余强度的形状参数(α_r)。

$$\sum_{i=1}^M \left(\frac{\sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}^{\alpha_L} \ln(X_{ij})}{\sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}^{\alpha_L}} \right) - \sum_{i=1}^M \frac{n_{fi}}{\alpha_L} - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{n_i} \ln(X_{ij}) = 0 \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^M \left(\frac{\sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}^{\alpha_r} \ln(W_{ij})}{\sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}^{\alpha_r}} \right) - \sum_{i=1}^M \frac{n_{ri}}{\alpha_r} - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{n_i} \ln(W_{ij}) = 0 \quad (2)$$

式中: M 为总的试验组数; n_i 为第*i*组的试验件数; n_{fi} 为第*i*组的失效试验件数; n_{ri} 为试验过程正常工作的试验件数; X_{ij} 为第*i*组的第*j*个试验件的疲劳循环数; W_{ij} 为第*i*组的第*j*个未失效试验件的剩余强度。

运用 MATLAB 对方程(1),(2)进行计算编程,解出试验件的疲劳寿命和剩余强度的形状参数分别为: $\alpha_L=2.96$, $\alpha_r=37.83$ 。然后运用文献[10]中的载荷放大系数法,具体方程见式(3)—(6),可分别计算出一套完整的试样试验数据分析结果,并列于表3。

每个应力水平的疲劳寿命尺度参数为:

表3 湿热环境疲劳试验数据的计算结果

Table 3 Calculation results of fatigue test data in hot and humid environment

组号	总数 n_i	未失效 数 n_{ri}	失效 数 n_{fi}	寿命形状 参数 α_L	剩余强度 参数 α_r	寿命尺 度参数 β_{Li}	剩余强度尺 度参数 β_{ri}	平均疲劳 寿命 N_{Mi}	设计 寿命 N_i
1	5	5	0	2.96	37.83	无穷	87.11	无穷	无穷
2	5	5	0	2.96	37.83	无穷	61.63	无穷	无穷
3	6	4	2	2.96	37.83	1367900	51.42	1220800	578760
4	5	0	5	2.96	37.83	38902	0	34718	16460
5	4	0	4	2.96	37.83	23.52	0	20.99	9.95

$$\beta_{Li} = \left[\frac{1}{n_{fi}} \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}^{\alpha_L} \right]^{1/\alpha_L} \quad (3)$$

每个应力水平的剩余强度尺度参数为:

$$\beta_{ri} = \left[\frac{1}{n_{ri}} \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}^{\alpha_r} \right]^{1/\alpha_r} \quad (4)$$

每个应力水平的平均疲劳寿命为:

$$N_{Mi} = \beta_{Li} \Gamma \left[\left(\frac{\alpha_L + 1}{\alpha_L} \right) \right] \quad (5)$$

根据已知的形状参数模型,在所需可靠性(R)下,第*i*组应力水平的设计寿命为:

$$N_i = \beta_{Li} \left[\frac{[-\ln(R)]}{\chi_{\gamma}^2, 2\eta_L} \right]^{1/\alpha_L} \quad (6)$$

1.4.2 部件试验分析

对部件试验的计算分析,假设只试验1个部件($n_0=1$),且此部件的1倍寿命是100 000次循环。根据文献[10],可以求解得到该复合材料的寿命系数 $N_f=2.77$,载荷系数 $S_f=1.08$,最后得到 $LEF=1.08$,进而可求出该部件所需的试验时间 N_0 为1.08倍寿命。也就是说,将该部件的疲劳试验载荷超过工作应力的8.0%,试验时间增加到1.08倍寿命,也可达到所需B基准的可靠性和置信度。进而在增加适当的试验载

荷和试验时间的情况下,减少部件的总体试验时间和试验成本。

运用得到的载荷放大系数,对使用CCF300/5228A复合材料的某型运输机平尾的一个部件进行了加速疲劳试验。发现该部件1倍寿命确实至少可以承受108 000次循环,说明上述试验计算方法得到的 LEF 有效。

2 CCF300的载荷放大系数

在相同铺层方式下,对复合材料层合板进行上一部分相同的疲劳试验和分析处理,最后得到三种环境处理后复合材料层合板的载荷放大系数,结果见表4。进而可以得到如图5所示的不同湿热环境对 LEF 影响的拟合图。

从表4可以看出,随着温湿度的增加,复合材料疲劳寿命和剩余强度的形状参数都在单调递减,即复合材料的疲劳分散性逐渐增大,说明复合材料的疲劳分散性随着温湿度的增加而增大。复合材料的 LEF 并不是一个定值,随着复合材料疲劳分散性的逐渐增大, LEF 也在单调递增。说明复合材料的载荷放大系数与材料本身的疲劳分散性有着很密切的关系。

表4 三种湿热环境的载荷放大系数

Table 4 The load enhancement factor in three kinds of hot and humid environment

型号	寿命形状参数(α_L)	剩余强度参数(α_r)	寿命系数(N_F)	载荷系数(S_F)	载荷放大系数(LEF)	试验持续时间(N_0)
G	3.59	43.82	2.29	1.07	1.07	1.04
S	2.96	37.83	2.77	1.08	1.08	1.08
R	2.58	32.75	3.25	1.10	1.09	1.10

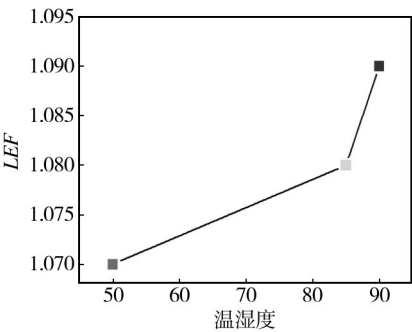


图5 湿热环境对LEF的影响

Fig.5 Effect of the hot and humid environment on LEF

3 结论

1) 文中对铺层方式为 $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$ 的CCF300/5228A复合材料层合板进行了疲劳试验,通过采用改进的联合威布尔分析的载荷放大系数法和MATLAB软件编程计算得到了三种湿热环境下复合材料层合板的LEF。

2) 在研究范围内,对比了不同湿热环境下得到的CCF300/5228A复合材料层合板的载荷放大系数,发现随着温湿度的增大,复合材料的形状参数单调递减,即复合材料的疲劳分散性逐渐增大,说明复合材料的疲劳分散性随温湿度的增加而增大。此时,LEF也单调递增,说明复合材料的载荷放大系数与材料本身的疲劳分散性有着密切的关系。CCF300/5228A复合材料层合板的载荷放大效果并不明显,不能很好地加速该复合材料的疲劳寿命试验,说明不同的复合材料需要分别确定其载荷放大系数来进行疲劳寿命加速试验。

参考文献:

[1] 陈跃良,徐丽,张勇,等. 2A12铝合金微动疲劳全寿命预测方法研究[J]. 装备环境工程,2014,11(4):1—6.

CHEN Yue-liang, XU Li, ZHANG Yong, et al. Research of Fretting Fatigue Holistic Life Prediction Method for 2A12 Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering,

2014,11(4):1—6.

[2] 陈跃良,王冬冬,张勇,等. T700碳纤维环氧树脂复合材料与2A12铝合金电偶腐蚀研究[J]. 装备环境工程,2014,11(6):40—44.

CHEN Yue-liang, WANG Dong-dong, ZHANG Yong, et al. Research for Galvanic Corrsion between T700 CFRP and 2A12 Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering,2014,11(6):40—44.

[3] WHITEHEAD R S,KAN,H P,CORDERO R,et al. Certification Testing Methodology for Composite Structures: Volume I—data Analysis[R]. Naval Air Development Center Report 87042—60 (DOT/FAA/CT—86—39),1986.

[4] 沈真,史有好,李国明. 复合材料许用值和结构设计值[C]//第五届商用飞机应用国际论坛.上海,2011:19—20.

SHEN Zhen,SHI You-hao,LI Guo-ming. Composites Allowables and Structural Design Allowables[C]// Fifth International Forum on Commercial Aircraft Applications.Shanghai, 2011:19—20.

[5] 郁大照,陈跃良. 含裂纹螺栓件应力强度因子三维有限元分析[J]. 机械工程学报,2011,47(20):121—126.

YU Da-zhao, CHEN Yue-liang. Stress Intensity Factor of Cracks in Bolted Joints Based on Three-dimensional Finite Element Analysis Research Situation and Key Technology of Calendar Life of Aircraft Structure under Corrosion Environment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47 (20) : 121—126.

[6] 叶广宁,陈跃良. 腐蚀和疲劳对飞机结构的挑战及解决思路[J]. 航空工程进展,2011,2(1):66—70.

YE Guang-ning, CHEN Yue-liang. Challenges and Counter-measure Investigation of Corrosion and Fatigue on Aircraft Structures[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering,2011,2(1):66—70.

[7] WALFF E G. Moisture Effects on Polymer Matrix Composites [J]. SAMPE Journal,1993,29(3):11—19.

[8] ABBOTT R. Design and Certification of the All-composite Airframe[R]. Society of Automotive Engineers Technical Paper Series—Document # 892210,1989.

[9] ABBOTT R. Test Based Load Enhancement Factor for Damage Tolerance Flaw Growth Testing[R]. Presentation to MIL—17 Workshop,2005.

- [11] 郝文魁,刘智勇,王显宗,等. 海洋平台用高强钢强度及其耐蚀性现状及发展趋势[J]. 装备环境工程, 2014, 11(2): 50—58.
HAO Wen-kui, LIU Zhi-yong, WANG Xian-zong, et al. Current Situation and Prospect of Studies on Strength and Corrosion Resistance of High Strength Steel for Ocean Platform[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(2): 50—58.
- [12] 曹宏涛,李雪亭. 基于海洋环境的紧固件腐蚀防护要求及采取措施[J]. 表面技术, 2013, 42(1): 105—108.
CAO Hong-tao, LI Xue-ting. Corrosion Protection Requirements and Technical Measures of Fasteners Based on the Marine Environment[J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 105—108.
- [13] 王彬,苏艳. 铝合金大气腐蚀行为及其防腐措施研究进展[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 64—68.
WANG Bin, SU Yan. Research Progress in Atmospheric Corrosion Behavior and Anticorrosion Measures of Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(2): 64—68.
- [14] 屈庆,严川伟,万晔,等. NaCl沉积对Zn的大气腐蚀产物影响的FTIR光谱研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(1): 16—18.
QU Qing, YAN Chuan-wei, WAN Ye, et al. Analysis of Atmospheric Corrosion Products of NaCl-Deposited Zinc Surface by FT-IR Spectroscopy[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2002, 14(1): 16—18.
- [15] 邹妍,王佳,郑莹莹. 锈层下碳钢的腐蚀电化学行为特征[J]. 物理化学学报, 2010, 26(9): 2361—2368.
ZOU Yan, WANG Jia, ZHENG Ying-ying. Electrochemical Corrosion Behaviors of Rusted Carbon Steel[J]. Acta Phys Chim Sin, 2010, 26(9): 2361—2368.
- [16] 徐秀清,魏丹,俞莹滢,等. Cl⁻浓度对含盐污水中10#碳钢腐蚀行为的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(4): 59—61.
XU Xiu-qing, WEI Dan, YU Ying-ying, et al. Influence of Cl⁻ Concentration on the Corrosion Behavior of 10# Carbon Steel in Saline Wastewater[J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 59—61.

(上接第104页)

- [13] SAEEDIKHANI M, JAVIDI M, YAZDANI A. Anodizing of 2024-T3 Aluminum Alloy in Sulfuric-Boric-Phosphoric Acids and Its Corrosion Behavior[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(9): 2551—2559.
- [14] 张云霞. 基体表面粗糙度对化学镀镍层耐蚀性的影响[J]. 电镀与环保, 2014, 34(6): 18—20.
ZHANG Yun-xia. Effects of Substrate Surface Roughness on Corrosion Resistance of Electroless Nickel Coating[J]. Electroplating & Pollution Control, 2014, 34(6): 18—20.
- [15] 包信方. 基板粗糙度对镀锡板耐蚀性的影响[J]. 材料保护, 2014, 47(2): 5—7.
BAO Xin-fang. Effects of Substrate Surface Roughness on Corrosion Resistance of Stannum Coating[J]. Materials Protection, 2014, 47(2): 5—7.
- [16] 韩东锐,韩冰,隋景堂,等. 6061铝合金在高温流动海水中的腐蚀行为[J]. 装备环境工程, 2011, 8(3): 1—4.
HAN Dong-rui, HAN Bing, SUI Jing-tang, et al. Corrosion Behavior of 6061 Aluminum Alloy in High Temperature Flowing Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(3): 1—4.
- [17] 陈庆,时黎霞,腾玉华. 介质的成分、浓度和温度对金属材料电化学腐蚀的影响[J]. 吉林化工学院学报, 2000, 17(1): 63—66.
CHEN Qing, SHI Li-xia, TENG Yu-hua. The Influences of Composition, Concentration and Temperature on the Electrochemical Corrosion of Metal Materials[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2000, 17(1): 63—66.

(上接第99页)

- [10] ABBOTT R, KOLARIK A L. Strength Substantiation of the All-composite Airframe (a Materials Database Approach) [C]// Proceedings of the 33rd International SAMPE Symposium, 1989.
- [11] ASHTON H R. Damage Tolerance and Durability Testing for F/A-18 E/F Composite Materials Structures[C]// AIAA Paper 96-1320, 1996.
- [12] 沈真,张晓晶. 复合材料飞机结构强度设计与验证概论[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2011.
SHEN Zhen, ZHANG Xiao-jing, et al. An Introduction to Design and Verification for Composite Aircraft Structures[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2011.
- [13] 赵渠森. 先进复合材料手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
ZHAO Qu-sen. Advanced Composite Materials Handbook[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2003.
- [14] JAMES Giancaspro, WINSON Taam, RAYMOND Wong. Modified Joint Weibull approach to determine load enhancement factors[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 3: 787—790.
- [15] MIL-HDBK-17, 结构材料表征指南 第一卷: 聚合物基复合材料[S].
MIL-HDBK-17-3F, Composite Materials Handbook Volume 1: Polymer Matrix Composites[S].