

复合材料疲劳性能研究

Fatigue Performance of Composites

北京航空材料研究院
航空材料检测与评价北京市重点实验室

马丽婷 陈新文 邓立伟 王海鹏 王翔

[摘要] 对复合材料的疲劳性能进行了研究,通过对典型复合材料疲劳性能的测试及试验结果进行分析和讨论,得出结论:(1)该复合材料疲劳寿命的分散性较大,尤其在较低寿命区,故个别点的疲劳寿命无法满足90%置信度的中值寿命;(2)从疲劳试验过程的观察可发现,试样表面出现分层后,还有较长的一段寿命期;(3)通过疲劳试验结果得到 $\pm 45^\circ$ 铺贴的复合材料条件疲劳极限 $\sigma_r=91.656\text{MPa}$ 。

关键词: 复合材料 疲劳 测试 力学性能

[ABSTRACT] Fatigue properties of composites are studied, the typical composites fatigue performance is tested and test results are analyzed and discussed, conclusion is obtained: (1)the dispersivity of the fatigue life of composite materials is larger, especially in the low life expectancy, so the fatigue life of individual points cannot meet the 90% confidence level of the value of life; (2)observation from fatigue test process finds when the sample surface appears layer, it still has a long life period; (3) through the fatigue test results of plus or minus 45° brick composites fatigue limit condition is $\sigma_r=91.656\text{MPa}$.

Keywords: Composites Fatigue Test Mechanical properties

随着复合材料在军民各行业中用量的逐渐加大,对材料性能的要求也越来越高,因复合材料构件失效导致的事故也时有发生^[1]。复合材料因具有层合结构、多组份、制造工艺复杂且影响因素多、力学性能易受环境温度的影响等特点,其失效机理非常复杂^[2]。本研究中的复合材料较以往的材料在性能上有很大的提高。同其他复合材料相同,这三种复合材料制成的部件在贮存、停放或飞行过程中不可避免地受到各种环境因素的作用,从而导致性能下降,也就是通常所说的老化^[3]现象。因此复合材料老化后的力学性能,也愈加引起材料生产和飞行器设计部门的高度重视,成为考查材料的重要指标。为材料设计生产部门提供数据依据。

1 试验设备和仪器

试验在 INSTRON 8801 试验机上进行。试验件的

几何尺寸用精度为0.02mm的游标卡尺测量。温度监测系统由固定在试样中间部位的温度传感器接在温控箱上,可随时监测试验过程中试样的表面温度。

2 试件

试样数量为35件,尺寸:250mm×25mm×2mm。成组法测试20件,升降法测试条件疲劳极限10件,备用试样5件。拉伸疲劳试样形式见图1所示。

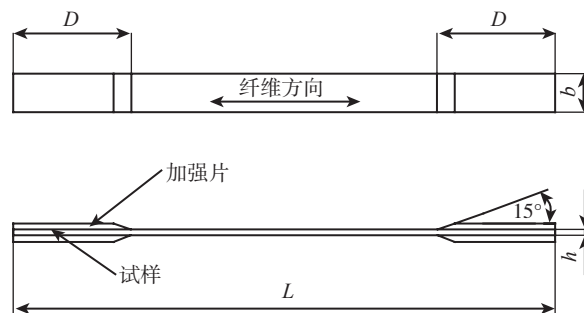


图1 拉伸疲劳试样
Fig.1 Tensile specimen

3 试验

3.1 试验条件

试验件: $K_t=1.0$ 的无损伤试验件; 试验频率: $f=1.5\text{Hz}$; 试验环境条件: 温度为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, 湿度为 $(50 \pm 10)\% \text{RH}$; 应力比: $R=0.05263$; 加载波形: 正弦波; 加载方式: 轴向拉-拉; 动态载荷误差: 小于 $\pm 2\%$; 条件疲劳极限指定寿命: 1×10^6 周期。

3.2 试验过程

该试验用成组试验法完成了4个数据点的测量,用升降法完成了条件疲劳极限($N=1 \times 10^6$)的测量。

成组法部分: 通过预试验确定对应于疲劳寿命在几千周期、2万~3万周期、6万~8万周期、20万~40万周期的加载系数 K , $K=\sigma_{\max}/\sigma_b$ (σ_{\max} 为最大应力), 然后根据确定的4级加载系数进行疲劳试验。4级的加载系数 K 值分别取 0.60、0.52、0.48、0.44。

升降法部分: 用升降法测试试样的条件疲劳极限, 指定寿命为 1.0×10^6 周期。应力对子为5对, 有效试验结果10个。该部分选取的加载系数 K 值分别为: 0.38、0.4、0.42。

对所有试样,记录在每一级应力水平下的应力水平值,并每隔 1min 记录一次试验时间、循环次数、载荷峰值和位移峰值(包括成组法和升降法试验)。

4 结果与讨论

4.1 疲劳试验数据处理

(1) 成组试验方法的试验数据处理方法:

$$X_i = \log N_i \quad (1)$$

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n X_i \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2}{n-1}} \quad (3)$$

$$C_v = S/\bar{X} \quad (4)$$

$$N_{50} = \lg^{-1} \bar{X} \quad (5)$$

式中, N_i 为第 i 个试件疲劳寿命; X_i 为对数疲劳寿命(或者叫子样观测值); n 为子样个数; \bar{X} 为子样平均值; S 为子样标准差; C_v 为变异系数; N_{50} 为中值疲劳寿命。

在成组法中,试验数据是否满足置信度要求,用变

异系数 C_v 判断。

(2) 升降试验方法的试验数据处理方法:

$$\sigma_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m v_i \sigma_{\max i} \quad (6)$$

$$K_r = \sigma_r / \sigma_b \quad (7)$$

v_i 为 i 级应力 $\sigma_{\max i}$ 的试验次数; n 为试验总次数; m 为应力水平的级数; σ_r 为条件疲劳极限; K_r 为条件疲劳极限对应的加载系数。

4.2 复合材料 S-N 曲线测试结果

复合材料疲劳性能试验有效数据见表 1, S-N 曲线如图 2 所示,试验典型断口如图 3 所示。

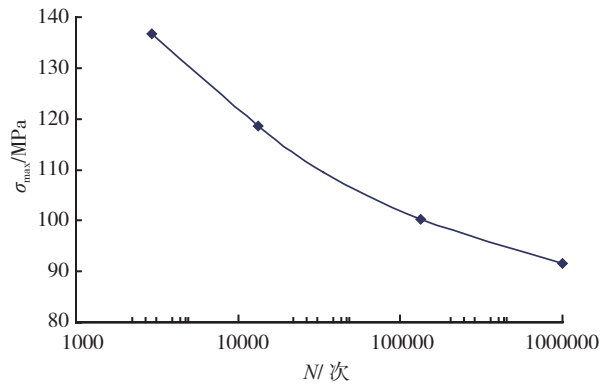


图2 复合材料拟合的S-N曲线 (R=0.05263)
Fig.2 S-N curves of composite fitting (R=0.05263)

表1 复合材料疲劳性能有效试验数据

σ_{\max} /MPa	N_i /次	\bar{X}	S	C_v	N_{50} /次
136.8	8130	3.4685	0.4122	0.1188	2941
	1268				
	7816				
	1168				
	2337				
118.56	26479	4.1231	0.2324	0.0564	13277
	8116				
	8627				
	20682				
	10765				
109.44	124800	4.5423	0.3755	0.0827	33343
	53551				
	14231				
	19894				
	27197				
100.32	91429	5.1241	0.2385	0.0465	133076
	78093				
	183450				
	295107				
	108017				
95.76	615239	指定寿命 $N=1 \times 10^6$, $K_r = 0.402$, $\sigma_r = 91.7\text{MPa}$			
	202386				
	295039				
91.2	>1000000				
	>1000000				
	>1000000				
	689860				
86.64	963490				
	>1000000				
82.08	>1000000				
	>1000000				



图3 疲劳试验件典型断口
Fig.3 Fatigue test pieces of a typical fracture

5 结论

(1) 所有断裂试样均在有效部位断裂,由于试样较薄较长,卸下的未断试样有些弯曲变形。

(2) 该复合材料疲劳寿命的分散性较大,尤其在较低寿命区,故个别点的疲劳寿命无法满足 90% 置信度的中值寿命。

(3) 从疲劳试验过程的观察可发现,试样表面出现分层后,还有较长的一段寿命期,比如有些试样在 9 万多多次时表面出现分层,到 20 多万次才发生断裂。

(下转第 79 页)

表2 试样体积密度

试样编号	体积密度 / (g·cm ⁻³)	烧结温度 / °C
MIT2Z3AF15	3.72365	1650
M2T2Z3AF15	3.80335	1650
M2T3Z3AF15	3.79255	1600
M2T4Z3AF15	3.80445	1550
M2T5Z3AF15	3.78500	1500

表3 HV和K_{IC}

试样编号	硬度 HV	断裂韧性 K _{IC} / (MPa·m ^{1/2})
MIT2Z3AF15	1549.7	9.0757
M2T4Z3AF15	1769.3	10.6788

表4 体积磨损率和磨痕宽度

试样编号	体积磨损率 / (10 ⁻⁵ cm ³ ·min ⁻¹)	磨痕宽度 / mm
MIT2Z3AF15	1.61	1.96
M2T4Z3AF15	1.18	1.70

损机理为粘着磨损和磨料磨损^[10]。

4 结论

晶粒细化后,即使用 2000 目氧化铝粉末制备的原位转化碳纤维增韧氧化铝陶瓷复合材料试样比 1000 目氧化铝制备的试样在致密度、硬度、断裂韧性、耐磨性方面均有所提高。用 2000 目氧化铝粉末制备的复合材料试样的较佳最高烧结温度为 1550℃,较 1000 目氧化铝粉末制备的试样烧结温度有所降低,且复合材料的晶粒较 1000 目氧化铝复合材料减小。

参考文献

[1] 朱志斌,郭志军,刘英,等.氧化铝陶瓷的发展与应用.陶瓷,2003(161):5-8.
 [2] 张敬强,荣守范,丰崇友.氧化铝陶瓷增韧的研究现状.铸造设备研究,2006(2):40-43.
 [3] 刘东亮,金永忠,邓建国. Al₂O₃ 陶瓷材料的增韧.现代技术陶瓷,2006,109(3):31-35.
 [4] 路学成,闫殿然.氧化铝陶瓷的增韧技术及机理.陶瓷,2006(12):11-15.
 [5] 钱伯章.碳纤维应用的最新进展.前沿科技,2009,27(10):58-62.
 [6] Huang S S, Zhou W C, Wei P, et al. Short-carbon fiber reinforced alumina ceramic with improved mechanical property and dielectric property in the Ku-band. Applications and Materials Science, 2013(6):1-6.
 [7] 曹晶晶.原位增韧 Al₂O₃ 陶瓷基复合材料的制备与性能研究[D].北京:中国矿业大学,2013.
 [8] 何柏林,孙佳.碳纤维增强陶瓷基复合材料界面的研究进

展.材料导报,2009,23(11):72-75.

[9] 王德成. PAN 基及沥青基碳纤维生产现状与展望.合成纤维工业,1998,21(2):45-48.
 [10] Buckley J D. Carbon-Carbon materials and composites. New Jersey: Noyes Publications, 1993:19-39.
 [11] 赵稼祥.世界碳纤维的现状与发展(一)-美国阿莫柯(AMOCO)公司.炭素技术,1995(6):36-40.
 [12] 曹晶晶,陈华辉,杜飞,等.助熔剂对原位转化碳纤维/氧化铝复合材料组织结构与性能的影响.硅酸盐通报,2013,32(3):389-397.
 [13] 李大梅,尤显卿,许育东.氧化铝基陶瓷材料断裂韧性的测量与评价.硬质合金,2004,21(4):231-236.
 [14] 高占峰.原位生成碳纤维增韧氧化铝陶瓷的制备及其性能研究[D].北京:中国矿业大学,2011.

(责编 良辰)

(上接第 72 页)

[3] 梁军,杜善义.粘弹性复合材料力学性能的细观研究.复合材料学报,2000,18(1):97-101.
 [4] Wang Y M, Weng G J. The influence of inclusion shape on the overall viscoelastic behavior of composites. Journal of Applied Mechanics, 1992, 59:510-518.
 [5] Hashin Z. Viscoelastic behavior of heterogeneous media. Journal of Applied Mechanics, 2003, 29:634-636.
 [6] 杨挺青.粘弹性力学.武汉:华中理工大学出版社,1992.
 [7] 王西昌,刘延栋.环氧树脂的蠕变行为——单环氧活性稀释剂对蠕变的影响.环氧树脂,1986,1:11-16.
 [8] Chandra V. Individual and interactive influence of temperature, stress, physical aging and moisture on creep, creep rupture and fracture of epoxy matrix and its composite[D]. Winnipeg: The University of Manitoba, 2001
 [9] Drozdov A D, Lejer A L H, Christiansen J D. Viscoelasticity, viscoplasticity, and creep failure of polypropylene/claynano composites. Compos Sci Technol, 2009, 69(15-16): 2596-2603.
 [10] 周祝林,万友生,杨云娣.关于复合材料弯曲蠕变试验方法的研究.纤维复合材料,1999,41(2):41-44
 [11] Bruckmeier S, Wellnitz J. Flexural creeping analysis of polyurethane composites produced by an innovative pultrusion process. Sustainable Automotive Technologies 2011, 2011: 13-18.

(责编 亦非)

(上接第 74 页)

(4)通过疲劳试验结果得到 ±45° 铺贴的复合材料条件疲劳极限 $\sigma_r = 91.656\text{MPa}$ 。

参考文献

[1] 益小苏.先进复合材料技术研究与发展.北京:国防工业出版社,2006:84.
 [2] 沈观林,胡更开.复合材料力学.北京:清华大学出版社,2006:132.
 [3] 黄丽.聚合物复合材料.北京:中国轻工业出版社,2001:120.

(责编 亿霖)