第2卷 第3期　　复 合 材 料 学 报　　Vol. 2 No. 3

1985年9月　　ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA　　September 1985

单向碳/环氧复合材料拉一拉疲劳性能研究

北京航空学院　杨乃宾　付惠民　高鎮同

摘　要

本文采用 GB 3354—84 规定的大标距直条試样对单向碳/环氧复合材料的拉一拉($R=0.1$)疲劳性能和剩余静拉伸強度进行了研究。用成組試驗法和升降法測定了 $S—N$ 曲綫和疲劳极限。試样疲劳破坏是由于沿纤維方向（纵向）疲劳裂紋的扩展引起的。試样剩余静拉伸強度大于 $0.7\sigma_b$。

一、試驗概述

1. 试件材料

纤维：高强Ⅰ型碳纤维（上海合成纤维研究所生产）。

基体：环氧648树脂（上海树脂厂生产）。

板材：单向鋪设。

厚度为2±0.07 mm，纤维体积含量63—64%，静拉伸强度 136kgf/mm^2(1.3Gpa)

2. 试样

试验采用 GB 3354—82 “定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法”中规定的试样。纤维方向平行于试样纵轴。试样试验前经过 X 光探伤检查。

3. 试验条件

加载方式：轴向拉一拉加载

应力比：$R=0.1$

试验机：瑞士 $AMSLER$ $10HFP$ 1—478 高频疲劳机

本文1984年11月收到

测力计量程：2000kg

工作频率：60—70Hz

试验环境：空气、室温

4. 试样疲劳破坏判据

在某一应力水平下、应力循环达到某一数值时，由于试样的损伤或裂纹扩展导致试验机停机或载荷下降，这时的应力循环数即认为是该试样在此应力水平下的寿命。

5. 试样疲劳破坏形式

试样的疲劳破坏形式见图1，其中上中图为拉—拉疲劳破坏，下图为通常的静拉伸破坏。我们可以看到在疲劳破坏试样上出现了很长的纵向裂纹。这种疲劳破坏形式与小标距蜂腰形试样呈现的纤维在工作截面处断裂的熟知形式是完全不同的。

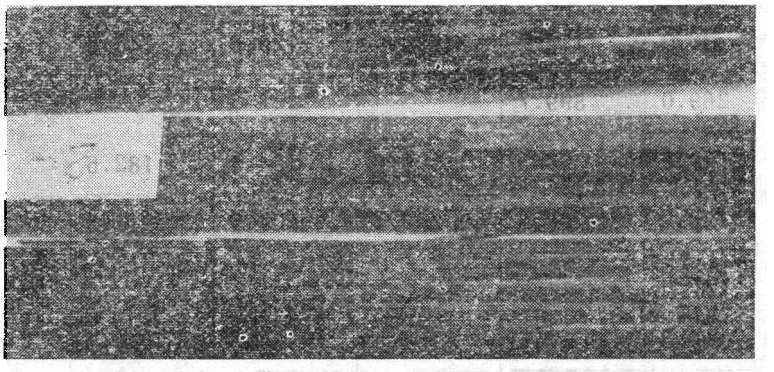


图1 試样破坏形式（高应力、低应力水平与静拉伸）

二、S—N曲线和疲劳极限

为了测定碳/环氧复合材料准确的 $S—N$ 曲线，采用了通常用在金属材料试验中的成组试验法和升降法。由于复合材料试验数据具有很大的分散性，因此需要比金属材料更多的试样。

分组试验在四个应力水平（$\sigma_{max}=68$，60，54，48kgf/mm^2）上进行，共用了54根试样。试验数据列入表1。

升降法试验在四个应力水平（$\sigma_{max}=48$，44，40，36kgf/mm^2）上进行，应力增量 $\Delta\sigma=4kgf/mm^2$，指定寿命为$N_0=10^7$。22根试样的试验数据在表2给出，某升降图见图2。

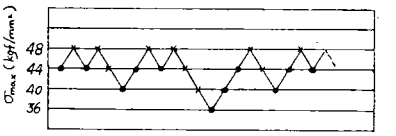


图2 升降图（$N_0=10^7$，$R=0.1$）
×…破坏；•…越出

估算疲劳极限$\bar{\sigma}$为

$$\bar{\sigma}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\nu_i\sigma_i=\frac{1}{22}(7\times48+10\times44+4\times40+36)$$

$$=44.18kgf/mm^2$$

表1　成组试验结果数据

应力水平	試样疲劳寿命					对数疲劳寿命平均值	标准差
σ_{max} kgf/mm^2	$N(10^3)$					$\bar{X}$	S
68	2.4	3.7	3.8	4.5	4.6	3.8918	0.4051
	5.6	6.5	12.6	14.5	34.9		
	39.8						
60	10.9	13.2	23.0	74.7	78.7	4.9224	0.5399
	96.0	114.7	120.0	129.6	145.3		
	269.0	899.7					
54	78.7	98.3	106.6	134.8	182.6	5.5079	0.6138
	193.7	293.0	306.4	604.5	2911.8		
	6216.3						
48	14.3	34.0	66.3	85.6	185.1	6.0128	0.9741
	228.9	350.7	538.7	734.2	807.0		
	1221.2	1239.9	2210.8	5553.0	8823.5		
	11492.0	12385.9	13531.0	16462.0	26550.0		

表2　升降法试验结果数据

应力水平	試样疲劳寿命				
σ_{max} kgf/mm^2	N				
48	5.34×10^5	5.597×10^5	17.677×10^5	44.24×10^5	61.34×10^5
	87.34×10^5	94.255×10^5			
44	1.021×10^5	33.591×10^5	76.641×10^5	$>10^7$	$>10^7$
	$>10^7$	$>10^7$	$>10^7$	$>10^7$	$>10^7$
40	19.78×10^5	$>10^7$	$>10^7$	$>10^7$	
36	$>10^7$				

$N_0=10^7$，疲劳极限 $\bar{\sigma}=44.18kgf/mm^2$

或者　　$\overline{\sigma}=0.325\sigma_b$

$S-N$曲线根据各应力水平的对数疲劳寿命平均值$\overline{X}$和疲劳极限$\overline{\sigma}$（见表2）绘制，如图3所示。

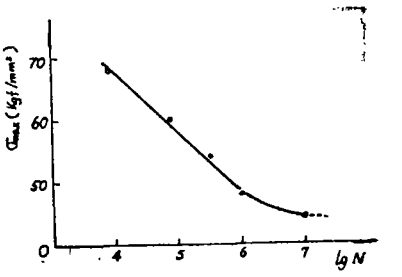


图3　单向碳/环氧复合材料拉一拉疲劳$S-N$曲线。

三、剩余静拉伸强度

剩余静拉伸强度是表示带有纵向疲劳裂纹的直条试样所具有的剩余静拉伸承载能力的指标。剩余静拉伸强度试验按试样成组试验的四个应力水平分组进行。每个应力水平取5根试样。试样破坏过程：当拉伸载荷施加至$0.5\sigma_b$左右时，试样表层纤维首先断裂，载荷开始波动。纤维陆续断裂，载荷波动直至试样拉伸破坏为止。图4给出了试样典型的载荷一变形曲线。图中（a）为静拉伸试件，（b）～（e）为疲劳试件。试验数据在表3给出。从表3数据可以看出试样的剩余静拉伸强度大于$0.7\sigma_b$。

表3　试样剩余静拉伸强度试验结果数据

应力水平	試样的疲劳寿命	剩余静拉伸强度 kgf/mm^2			变異系数	剩余静拉伸强度系数**
σ_{max} kgf/mm^2	N 10^3	起始破坏强度*	最終破坏强度	最終破坏强度平均值	C_v	
68	2.4		98.4	106.24	0.213	0.772
	3.7	82	104.8			
	4.5		114			
	4.6		138			
	14.5		76			
68	10.9	80	109.2	103.2	0.136	0.75
	23.0	80	111.6			
	78.7	88	108			
	114.7	57.6	78			
	145.3	91.2	109.2			

54	78.7	96.8	106.8	118.48	0.107	0.861
	106.6	92.8	117.6			
	182.6	74	112			
	306.4	82	140			
	604.5		116			
48	81.9	78	110	98.6	0.140	0.716
	197.2	72	87.2			
	352.8	56	87			
	441.8	76.8	92			
	2005.0		116.8			

注：*起始破坏强度是指加载过程中试样表面纤维断裂，载荷开始波动时的强度值。空格表示加载过程无此现象；

**剩余静拉伸强度系数为试样剩余静拉伸强度与材料静拉伸强度之比。

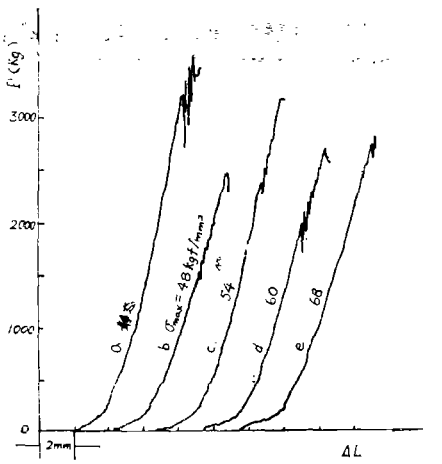
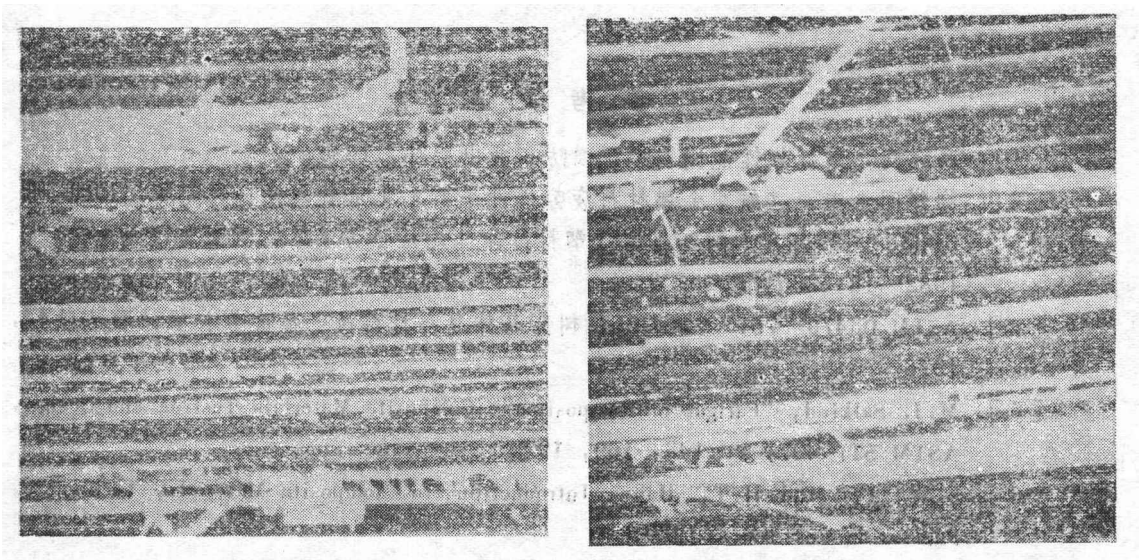


图 4　典型载荷—变形曲线

四、試样破坏分析

1.　纵向疲劳裂纹断口扫描电鏡分析

直条试样纵向疲劳裂纹断口扫描电鏡照片表明断口为剪切破坏断口，如图 5 所示。剪应力是由纵向拉—拉载荷诱导产生的。剪切破坏断口说明所测得的疲劳性能与基体和界面的性能密切相关，沒有充分发挥纤维的承载能力。所以，所测得的 $S-N$ 曲线和疲劳极限对应为单向碳/环氧复合材料拉—拉疲劳性能的下限值。



（a）高应力水平試样　　（b）低应力水平試样

图 6　試样纵向疲劳裂紋典型断口照片

2．剩余静拉伸强度试样破坏形式分析

直条试样常规静拉伸破坏时一般呈现散絲断裂，断裂的纤维絲束比较细。而剩余静拉伸强度试样破坏时，虽然也呈现散絲断裂，但断裂的纤维絲束比较粗大，（见图1）。粗大的断裂纤维束说明直条试样在拉一拉疲劳载荷作用下纵向（沿纤维方向）主裂纹产生、扩展的同时，还产生了许多横向微小裂纹。这些横向微小裂纹解释了试样在进行剩余静拉伸强度试验时造成许多纤维在同一弱截面上断裂，形成粗大的纤维絲束断裂的现象。

单向复合材料纵向拉伸强度主要由纤维的承载能力确定。直条试样高达 $0.7\sigma_b$ 的剩余静拉伸强度说明试样经拉—拉疲劳载荷作用后，纤维的损伤并不严重。

五、結　論

1．单向碳/环氧复合材料大标距直条试样拉—拉（$R=0.1$）疲劳破坏是由于沿纤维方向疲劳裂纹扩展引起的。断口为剪切型断口。这种破坏形式沒有充分发挥纤维的承载能力。

2．单向碳/环氧复合材料用分组试验法确定其拉—拉（$R=0.1$）疲劳 $S-N$ 曲线为一条直线，在接近疲劳极限处发生转折。

3．单向碳/环氧复合材料用升降法试验估算其拉—拉（$R=0.1$）疲劳极限为 $\bar{\sigma}=0.32\sigma_b$。

4．单向碳/环氧复合材料大标距直条试样拉—拉（$R=0.1$）疲劳试验后，其剩余静拉伸强度大于 $0.7\sigma_b$，其载荷—变形曲线在 $0.5\sigma_b$ 以下为直线，此后载荷虽增加但波动直至试样拉伸破坏为止。

致谢：试验工作得到了洪都机械厂中心实验室尹为恺同志的大力协助，在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

[1] 高鎮同，《疲劳性能測試》，国防工业出版社，1980.

[2] 高鎮同主編，《航空金属材料疲劳性能手冊》北京航空材料研究所，1981.

[3] GB3354—82，《定向纤維增強塑料拉伸性能試驗方法》，国家标准局，1982—12—25发布。

[4] ASTM D3479—76，《定向纤維树脂基体复合材料拉—拉疲劳标准試驗方法》，1976.

[5] M.J. Salkind, "Fatigue of Composites" ,Composite Materials Testing and Design, ASTM STP 497, PP.143—169, 1972.

[6] S.W. Tsai and H.T. Hahn, Introduction to Composite Materials, Technomic Publishing Co. Inc., 1980.

日本FRP浴盆、卫生间近况

目前在日本，不銹鋼浴盆用得最多，*FRP*浴盆其次，第三是搪瓷浴盆等。在*FRP*浴盆中，采用*SMC*模塑成型的占45%，例如有的公司采用3,500吨压机每三分钟模压3个大、中、小号各一个浴盆。噴射成型占30%，手糊成型占25%。

1984年日本新建的1,19万套住宅中，488,420戶安装了*FRP*抽水馬桶（占41%），329,429戶安装了卫生間（占29%），158,937戶安装了*FRP*浴盆（占13%）。由此可见，卫生間用得較多，处于发展趋势，单个*FRP*浴盆处于平稳发展的趋势。

卫生間分为整体卫生間、上下两半組合卫生間、平板組合卫生間（框架式和元框架式两种）。整体卫生間安装需要吊装設备，再有日本高級旅館的卫生間大約每5年就得更新，基于此日本近来整体卫生間用得較少、而平板組合式卫生間用得較多。*SMC*模压成型采用鋼模具，手糊和噴射成型采用*FRP*模具。*FRP*模具的成型工序是：木模具→石膏模具→*FRP*阴模→*FRP*阳模。

日本工业标准(*JIS*)关于*FRP*浴盆、卫生間有10个，其中规格标准：*JIS A*0061、*JIS A*5704、*JIS A*5712；卫生間設备标准：*JIS A*0012、*JIS A*1104、*JIS A*1708、*JIS A*1709、*JIS A*1712、*JIS A*4410、*JIS A*4413。

（[日本]百島祐忠介紹、董永祺整理）

Abstract

This paper is concerned with the damage of cross-ply carben fiber reinforcod epoxy composites under static and fatigue loading. Acoustic emission, microscopic observation, infrared thermography are employed to detect the formation and prepagation of the damage and to test the fatigue behaviour. The relationships of microstructure damage with acoustic emission characteristic parameter and temperatuer variation are studied. The damage mechaniesm of unnotched and notched specimens are compared. It is shown that the crack propagates along the weak bonding face and the damage dimension of carbon/epoxy [0/90] laminate is larger than 0^0 ply and $\pm 45^\circ$ ply laminates. The fatigue failure modes and the rate of crack propagation are different under various stress levels. The sudden increase of temperature and the acoustic emission weighted ringdown cumulation during fatigue process presents a rapid development in damage and failure would occur in a not long period. It is also shown that delamination is most severe under fatigue stage.

TENSION-TENSION FATIGUE BEHAVIOUR OF UNIDIRECTIONAL GRAPHITE/EPOXY COMPOSITE

Yang Naibin, Fu Huimin, Gao Zhenlong

Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China

(Received Nov. 1984)

Abstract

In this paper tension-tension (R=0.1) fatigue behaviour and residual static tensile strength of unidirectional graphite/epoxy composite were studied by using GB 3354—82 specimens of straight-sided type with long gage length (GB—National Standard, China). The S—N curve and fatigue limit were obtained by means of test method in group and the staircase method. The number of stress cycles, at which the machine stops or the load drops due to the damage or crack occuring in the specimen, is taken as the life of the specimen at that stress level. The S-N curve is a straight line and tends to horizon near the fatigue limit. The fatigue limit is $0.325\sigma_b$. The failure of specimens resulted from the development of the longitudinal cracks. The appearnce of longitudinal cracks is apparently due to shaer fractures. The shear fractures show that the fatigue behavior obtained bears a close relation with the properties of matrix and interface. The load-carrying capacity of fibers has not been fully utilized, so the S-N curve and fatigue limit obtained correspond to the lower limit of the tension-tension fatigue behaviour of graphite/epoxy unidirectional composite. The specimens with longitudinol cracks were also tested for residual static tensile strength which was found to be

0.7 σ_b or more. And the curves of load-deformation are straight lines up to $0.5\sigma_b$, then the loads keep increasing and fluctuating until the failure of specimens.

THE EFFECT OF KH-560 AGENT ON THE CURING OF GLASS/EPOXY COMPOSITES

Sun Mujin, Wu Yisheng and Zhang Qizhong

Institute of Chemistry, Academia Sinica, Beijing, China

(Received March 1985)

Abstract

The effect of R-Glycidoxypl trime thoxysilane (KH-560) surface treatment agent on the curing process of glass-fibre/epoxy composite has been studied by means of torsional braid technology. When both sizing and preblending mdthods of surface treatment are used to add KH-560 into composite, the curing rate decreases and the reaction activation energy increased.

THERMAL EXPANSION PROPERTIES OF COMPOSITES

Xie Weizhang and Sun Shiqing

East China Institute of Chemical Technology, Shanghai, China

(Received July 1984)

(Revised April 1985)

Abstract

The thermal expansion properties of unidirectional fiber reinforced composites were studied in this paper. The interface adhesive coefficient C was introduced and the thermal elastic theory was used to derive the equatien calculating the revised linear expansion coefficient. The linear expansion coefficients of both glass and carbon fiber reinforced composites had been measurred by thermal analysis method under different interface conditions and different fiber contents. The calculated values coincided with the measured values and the deviations were only less than 10%.