

碳纤维复合材料破坏的超声波检测

朱进生 洗杏娟 李传鼎

中国科学院力学研究所

摘要: 本文对碳纤维增强复合材料 0° 、 $\pm 45^\circ$ 和 $0^\circ/90^\circ$ 铺层的无缺口、有直边缺口、有中心圆孔和有中心缺口层板,作了静态拉伸试验研究。采用超声波扫描成像检测方法,检测了碳/环氧复合材料在不同加载区域内的损伤分布及损伤程度,得到了载荷—损伤程度曲线和材料内部缺陷分布的分层图象。结果表明:带有垂直于载荷方向直边缺口的试件在受静态拉伸时,裂缝不是沿缺口长度方向作自相似扩展,而是沿纤维方向的界面扩展,缺口基本上不影响试件无缺口部分的承载能力;对于带中心缺口的试件,首先出现缺口尖端的界面分离;带中心圆孔的试件,损伤从孔周开始,逐渐沿纤维方向扩展。本文还分析了试件的损伤和破坏机理。

一、引言

碳纤维增强复合材料是由纤维、基体和界面等几个方面组成的,其微观构造是一个复杂的受力结构,而且是不均匀的和各向异性的。因此,复合材料的设计、研制和使用都与力学密切相关。它的破坏机理和破坏模式要比金属材料复杂得多。它在加工和使用过程中出现的缺陷,也比金属材料要多。它的破坏与纤维、基体和界面的性能、粘结状况、纤维的铺设方向和次序以及加载条件等有关。研究复合材料在不同载荷、不同铺层与不同缺口情况下的内部结构和损伤,需要采用有效的试验和分析方法,来评定复合材料的损伤和破坏。检测复合材料的破坏,用常规的机械和物理实验方法已不能满足要求,需要采用高技术测试方法。采用云纹法、红外热象法等无损检测方法只能检测试件的表面情况,而采用超声波无损检测法却可监测材料内部的缺陷和破坏情况,确定损伤的分布和程度。它是由探伤仪发射超声波,被测材料中的缺陷将超声波反射回来,以反射波的有无及反射波的强弱来判断缺陷的有无及严重程度,由反射信号在探伤仪萤光屏上的位置,来确定缺陷的深度。再把该信号送到图象处理器进行图象处理,可得到材料内部缺陷的分布图象。国外在这方面已做了不少工作^[1],研制出各种超声成象系统;在国内,这方面的工作开展得还较少。为了有效而又可靠地使用复合材料,充分发挥它的优越性,为结构设计提供可靠依据,研究复合材料内在损伤的超声扫描检测方法,评定复合材料的破坏是非常必要的和很有意义的。

本文1989年7月收到,国家自然科学基金资助项目

本文对多种铺层 $[0^\circ]$ 、 $[\pm 45^\circ]$ 和 $[0^\circ/90^\circ]$ 的无缺口和有直边缺口,以及有中心缺口、中心圆孔等碳/环氧复合材料层板,进行静态拉伸试验,用超声波扫描检测方法,研究碳/环氧复合材料在不同加载区域(线性区、非线性区、稳定扩展区和不稳定扩展区)的损伤状况及损伤发展过程,以评定复合材料的破坏。

二、试件与试验方法

试验材料为碳/环氧复合材料,碳纤维含量为60%,先经热压工艺制成层板,然后加工成长条形试件,按照材料组分、工艺、铺层和几何尺寸的不同,分为B、C二类,每类中有带双边缺口(B—D)、带中心圆孔(BI—H)及带中心缺口(CV—C)等共五种试件。试件的缺口在程序控制切割机上加工,缺口长度 $2a$ 分别为20mm和6mm,缺口宽度为0.2mm,边缘缺口垂直于载荷方向;试件的中心圆孔直径分别为18mm、4mm和6mm,各类试件的边缘缺口、中心圆孔及中心缺口形状见图1,各种类型试件的具体情况及其试件拉伸断裂性能测试结果见表1。

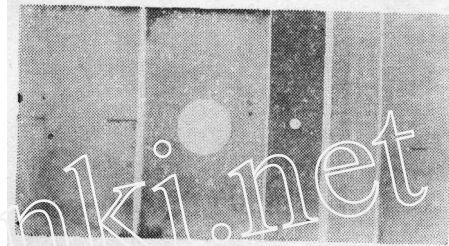


图1 各类试件

表1 碳/环氧复合材料试件拉伸断裂性能测试结果

材料	试件铺层	试件宽度 w (mm)	试件厚度 t (mm)	无缺口试件			
				拉伸强度 σ_o (MPa)	拉伸模量 E (GPa)	应变 $\varepsilon\%$	泊松比 γ
T300/648	(0)BI—D ₃	40	1.8	1740	145	1.09	0.285
	(0)BI—H ₃	40	1.75	1740	145	1.09	0.285
S220/648	(±45)CI—H ₁	18	2.65	133	14.5	0.25	0.296
	(0/90)CV—H ₁	15	3	671	59.1	0.875	0.062
	(0/90)CV—C ₁	25		671	59.1	0.875	0.062

缺口情况	缺口长度 (mm)		$2a/w$	带缺口试件拉伸强度		
	$2a$	d		全截面 σ_f (MPa)	净截面 σ_n (MPa)	σ_f/σ_o
双边缺口DEN	20		0.50	330	659	0.50
中心孔CH		18	0.45	267	486	0.55
中心孔CH		3.6	0.20	101	119	0.76
中心孔CH		2.25	0.15	545	641	0.85
中心缺口CN	6		0.24	337	481	0.50

静态拉伸试验是在Instron 1195型万能试验机上进行的,采用应变片测量应变,自动记录应力应变曲线,对载荷的不同区域,用日本CANNONM—500型超声波探伤成象装置检测材料内部的损伤分布及损伤程度,碳/环氧复合材料试件超声波扫描测试结果见表2。采用的是脉冲反射法,该装置由探头、扫描单元、M—500A超声波探伤仪、M—500IP成象处理器和彩色拷贝机组成,其方框图如图2所示。它是由探伤仪发射超声波脉冲,当超声波脉冲在

材料中传播时，在不同材料的界面上和有缺陷断面上具有反射特性，探伤仪可将反射波显示出来，再利用扫描装置，将所得到的整个材料的信号进行数字信号处理、成象技术处理和成象显示并记录下来。成象显示可以是A型、B型、C型和3D型。一次探伤可做多种图象处理，并可在同一面上成象处理并记录多种图象（平面及断面图象等），而且可以在同一张图象上用七种不同的颜色来表示缺陷的位置及大小。

表2 碳/环氧复合材料试件超声波扫描测试结果

材料	试件铺层	增益 (db)	带 缺 口 试 件 拉 伸 阶 段							
			I		II		III		IV	
			未加载	损伤百分数 (%)	加载 (kg)	损伤百分数 (%)	加载 (kg)	损伤百分数 (%)	加载 (kg)	损伤百分数 (%)
T300/648	{0}BI-D3	24.3			483 20%	37.2	968 40%	50.0	1935 80%	77.9
	{0}BI-H3	24.3	12.9	1029 54%	42.9	1334 70%	53	1525 80%	58	
	{±45}CII-H1	41.3	28.3	34.6 16%	38.0			173 81%	45.6	
	{0/90}CIV-H1	41.3	23.1	385 15%	31.6	923 37%	38.4	1230 49%	45.0	
	{0/90}CIV-C1	27.3		327 20%	10.4	818 50%	24.0	1145 70%	34.3	

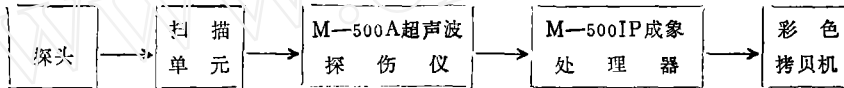


图2 M-500型超声波探伤成象装置的方框图

三、实验结果

0°铺层两侧带边缺口试件 (BI-D₃) 在加载前后用超声波检测，在加载前试件只有少量损伤，主要是层间粘接有缺陷。试件加载后，其应力应变关系是线性的，在0°铺层中主要由纤维承载，当加载至20%极限载荷时，就产生一定的损伤，显示门槛为20%时，损伤百分数为37.2%，主要由于缺口的初始张开而引起沿裂纹顶端的界面(沿纤维方向)分离，当加载至40%极限载荷时，纵向损伤继续沿纤维方向扩展，当加载至80%极限载荷时，损伤百分数高达77.9%，这时试件损伤扩展到试件内各层，穿透整个试件，直至破坏。载荷—损伤程度曲线基本上是线性的，见图3，极限拉伸强度为659MPa。用超声波扫描装置，检测了材料在不同加载区域内部缺陷的形状，大小和位置分布，并进行了比较。在同一张图上，可用七种不同的颜色分别表示缺陷在材料内部的不同层次，能直观地看出材料内部缺陷的产生和扩展情况，加载至80%极限载荷时，材料内部缺陷分布图(C+FB)

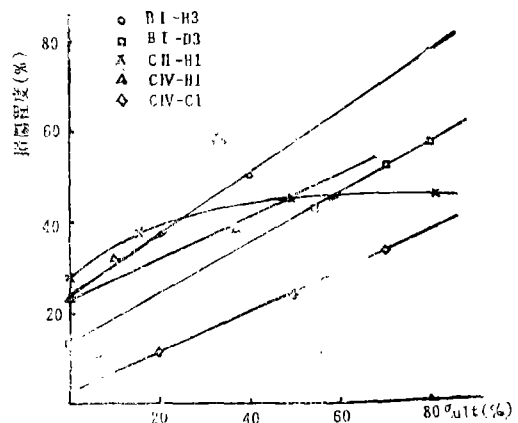


图3 碳/环氧σ_{ult}—损伤程度曲线

如图4所示。

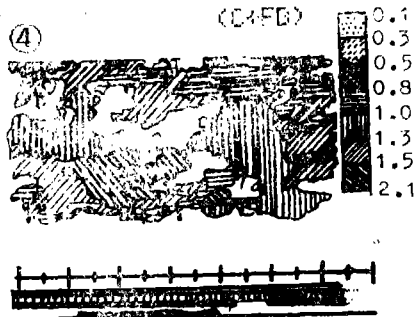


图4 80% σ_{ult} 0°试件内部缺陷分布图 (C+FB)

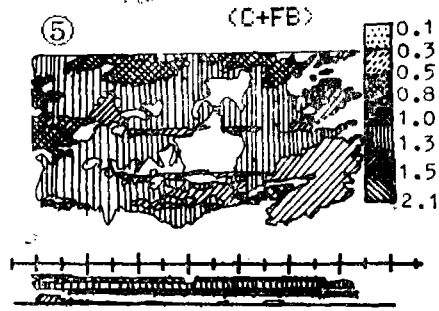


图5 80% σ_{ult} 试件内部缺陷分布图 (C+FB)

0°铺层带中心圆孔试件 (BI—H3) 在承受拉伸载荷后, 加载到20%极限载荷时, 只有少量损伤; 加载到54%极限载荷时, 损伤增大, 损伤百分数为42.9%, 在圆孔周围出现很多缺陷; 加载到70%极限载荷时, 试件在孔周围出现的裂纹继续扩展, 并沿纵向贯穿试件直至断裂, 损伤百分数为53%。载荷—损伤程度曲线稍有弯曲, 但基本上是线性的。见图3, 极限拉伸强度为468MPa。用超声波成像装置, 检测材料在不同加载区域内部缺陷的分布, 加载至80%极限载荷时, 材料内部的缺陷分布图 (C+FB) 见图5。

$\pm 45^\circ$ 铺层带中心圆孔试件 (CII—H1) 在加载前用超声波检测发现有一定的损伤, 受拉伸载荷后, 由于圆孔的存在, 使得试件在16%极限载荷时就出现有相当多的损伤, 圆孔周围出现裂纹, 当显示门槛为20%时, 损伤百分数达38%; 当继续加载, 树脂开裂并沿45°方向界面分离, 到81%极限载荷时, 各层分离导致剪切破坏, 损伤百分数为45.6%, 载荷—损伤程度曲线见图3。极限拉伸强度为119MPa, 加载至81%极限载荷时, 材料内部缺陷分布图 (C+FB) 见图6。

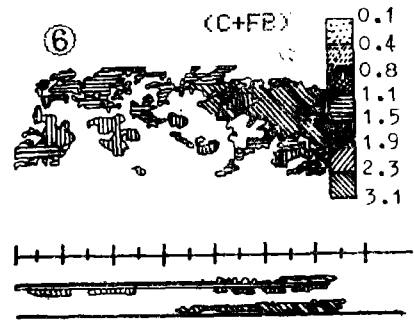


图6 81% σ_{ult} $\pm 45^\circ$ 试件内部缺陷分布图 (C+FB)

0°/90°正交铺层带有中心圆孔试件 (CIV—H1) 在加载前后用超声波检测, 加载前试件只有极小量的损伤, 主要是层间粘接缺陷, 当试件加载后, 在15%极限载荷且显示门槛为20%时, 损伤百分数为31.6%, 当加载至37%极限载荷时, 损伤主要是90°纤维之间脱胶开裂。当加载至49%极限载荷时, 纵向裂纹开始出现, 损伤迅速扩大。如果继续加载, 纵向纤维发生断裂, 直到最后试件断裂。载荷—损伤程度曲线见图3。极限拉伸强度为641MPa, 加载至49%极限载荷时, 材料内部缺陷分布图 (C+FB) 如图7所示。

0°/90°正交铺层带中心缺口试件 (CIV—C₁) 在承受拉伸载荷, 加载至20%极限载荷时, 只有少量损伤, 显示门槛为20%时, 损伤百分数为10.4%, 加载至50%极限载荷时, 出现有垂直于缺口的纵向裂纹, 同时有90°层的横向裂纹, 损伤增多, 损伤百分数为24%, 当加载至84%极限载荷时, 90°层的横向裂纹继续扩展, 直至断裂, 在纵向出现许多裂缝, 损伤百分数为34.3%, 载荷—损伤程度曲线见图3, 极限拉伸强度为481MPa, 加载至70%极

限载荷时,材料内部缺陷分布图(C+FB)见图8。

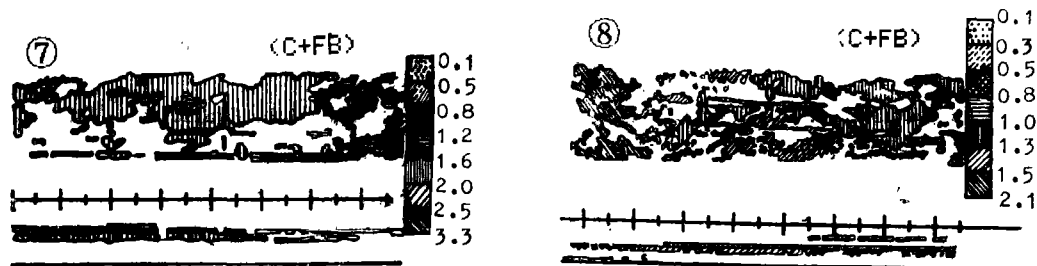


图7 49% σ_{ult} 0°/90°试件内部缺陷分布图(C+FB)

图8 70% σ_{ult} 0°/90°试件内部缺陷分布图(C+FB)

四、结 论

我们对[0°]、[±45°]和[0°/90°]铺层的无缺口和带有直边缺口以及中心缺口、中心圆孔等五种类型的碳/环氧复合材料层板,进行了静态拉伸试验,用M--500型超声波探伤成象装置,检测了碳/环氧复合材料在不同加载区域材料内部的损伤,得到了材料内部缺陷的分布及损伤程度。

1.由载荷—损伤程度曲线可以看到,在拉伸加载试验中,随着载荷的增加,损伤程度也迅速增加。0°和0°/90°铺层的载荷—损伤程度曲线基本上是线性的,而±45°铺层是随着载荷的增加,损伤程度开始是线性的增长,接着迅速增长然后逐渐变慢,转为非线性。

2.对0°、0°/90°和±45°三种铺层拉伸加载的碳纤维增强复合材料,0°铺层的层板其拉伸强度最高,0°/90°其次,±45°最低。0°/90°铺层的拉伸强度约为0°铺层的1/2。±45°铺层的拉伸强度约只有0°铺层的1/10。

3.0°铺层带直边缺口试件,受拉伸载荷时,裂纹不是沿缺口长度方向作自相似扩展,而是沿纤维方向产生和扩展,这是由于在裂纹尖端的应力场比较复杂,虽然沿纤维方向的应力很大,但还不至于发生断裂的程度,横向的拉应力和沿纤维方向的剪应力数值虽较小,却已超过它们的强度极限,因此产生沿纤维方向的裂纹,而使应力场发生变化,通常不产生纵向纤维的断裂。0°/90°铺层的试件,由于单向复合材料的横向拉伸强度 σ_T 很低,所以缺口顶端裂纹先从90°层横向扩展,这些横向裂纹要产生应力集中,影响0°方向纤维应力分布,导致出现纵向裂纹,断口较齐。±45°铺层的裂纹沿±45°方向扩展,这是由于沿纤维方向的面内剪切强度和层间剪切强度很低,因而发生剪切破坏。总之,应根据使用要求,精心设计不同铺层的材料。

4.对于带中心圆孔试件的孔边应力集中,由超声波扫描可看到,损伤从圆孔周围开始,然后逐渐沿界面方向扩展;带边缺口试件,其初始均为损伤从缺口张开,开始在缺口顶端出现裂缝,然后裂缝沿纤维方向扩展,边缘缺口并不影响无缺口部分材料的承载,缺口顶端裂纹不致直接引起材料破坏,它的强度可由无缺口材料部分来估算。

5.超声波扫描成象技术可以定量地检测材料内部的损伤及损伤程度,得到材料内部不同层次的缺陷分布图象和损伤百分数,可以直观地看出材料内部的缺陷情况,对研究复合材

料内部损伤是一种很好的无损检测手段。

绳钢同志参加了部分实验工作。

参 考 文 献

- [1] Schmitz, V. A New Ultrasonic Imaging System, *Materials Evaluation*, Vol 40 No 1 101—108 (1982)
- [2] 洗杏娟, 复合材料非破坏性测试, *力学进展*, Vol 12, No 3, 280—286 (1983)
- [3] 洗杏娟, 带边缺口碳纤维增强环氧复合材料静态与疲劳破坏, *中国科学*, No 2, 183—192 (1984)
- [4] Srivastava, V. K. and Prakash, R. Ultrasonic evaluation of corrosive environment on G R P composites, proceeding of six international conference on composite materials, July (1987) .
- [5] Teagle, P. R. The quality control and non-destructive evaluation of composite aerospace components, *composites*, Vol. 14 No.2 (1983) .
- [6] Chow, C. L. and Xian, X. J. Fracture Behaviour of carbon/epoxy composites with damage consideration, *Journal of reinforced plastics and composites*, Vol.9 No1 (1989)

ULTRASONIC EVALUATION ON FAILURE OF CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITE MATERIALS

Zhu Jinsheng, Xian Xingjuan, Li Chuanding

Institute of Mechanics, Academia Sinica

ABSTRACT

The static tensile tests of carbon fiber reinforced composite specimens ($[0^\circ]$, $[\pm 45^\circ]$, $[0^\circ/90^\circ]_s$) without notch, with double edge notch, central hole and central notch have been investigated experimentally. Using ultrasonic scanning and imager method, internal damage and damage percentage in different loading regions of carbon/epoxy composite were detected. The curves of loading—damage percentage and pictures of internal flaw distribution in different depths were obtained. The results show that during static tensile test, the crack propagates along the direction of the fiber interface instead of that of the edge notch in specimen. The notch does not affect the load-bearing capacity of ligament of the specimen. For the specimen with central notch, interface crack occurs at the tip of the notch. And the specimen with central hole, damage initiates around the hole, later, it extends along the fiber direction. In this paper, the failure mechanism is analysed also.

Key words: ultrasonic scanning and imager method, damage, failure mechanism