

文章编号: 1001- 2486(2005) 01- 0012- 04

## 铺层方式对碳/环氧管层间剪应力影响的有限元分析\*

彭超义, 曾竟成, 肖加余, 杜刚

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 利用有限元程序 ANSYS7.0 对软模膨胀成型制备的碳/环氧管在轴向载荷下的层间剪应力进行了分析。表明铺层的不对称性会显著导致环向层间剪应力增大, 增幅在 0.43~ 1.14 倍, 但对轴向层间剪应力影响很小; 碳/环氧管的轴向铺层和环向铺层的比例对轴向层间剪应力和环向层间剪应力有显著影响, 其比例在 7.3~ 4.1 时可以有效降低碳/环氧管的层间应力。

**关键词:** 碳/环氧管; 环向层间剪应力; 轴向层间剪应力; 有限元分析

**中图分类号:** TQ327      **文献标识码:** A

Finite Element Analysis of the Effect of Ply Arrangements on Shearing Stresses for C<sub>f</sub>/Epoxy Composite Tubes

PENG Chao-yi, ZENG Jing-cheng, XIAO Jia-yu, DU Gang

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Finite element software ANSYS7.0 is employed to analyze the interlaminar shearing stresses of C<sub>f</sub>/epoxy composite tubes under axial loading. The tubes are fabricated by the flexible expandable mould process. Analysis results show that asymmetry plies increase the hoop interlaminar shearing stresses by 0.43~ 1.14 times, but no effects on axial interlaminar stresses. The ratio of axial plies to hoop plies plays an important role on the hoop and axial interlaminar shearing stresses, which the stresses reach to a minimum when it's within the range of 7.3~ 4.1.

**Key words:** C<sub>f</sub>/epoxy tube; hoop interlaminar shearing stresses; axial interlaminar shearing stresses; FEA

由于聚合物基复合材料具有比其他传统材料更高的比模量和比强度, 所以随着聚合物基复合材料制备工艺的日益成熟, 其在土木建筑、海洋和空间工程的主承力结构中获得了越来越广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。而复合材料结构设计标准的不足常常成为限制复合材料有效应用的重要原因<sup>[3]</sup>。随着计算机技术的飞速发展和有限元分析手段的不断完善成熟, 许多有限元分析方法集成到商品化的通用软件包里, 可以很方便地用来对复合材料结构进行设计。研究人员做了不少试验对复合材料有限元分析设计进行了验证, 表明有限元分析在复合材料结构分析设计上具有可靠的精度<sup>[3-5]</sup>。

碳纤维复合材料管件已经应用于航空航天上的主承力结构<sup>[1,2]</sup>, 其制备方法主要有缠绕、内充气模膨胀法和内软模膨胀法等。对于主要承受轴向压力载荷的复合材料管件来说, 内软模膨胀法是一种优良的成型制备工艺。为了采用有限元方法分析铺层方式对管件层间剪应力的影响, 需要知道相同工艺制备的碳/环氧单向板的基本性能参数。本文中所采用的单向板性能参数由相同工艺条件下软模膨胀法制备的单向板测得, 见表 1。其中,  $V_f$ ,  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $G_{xy}$ ,  $\nu_{xy}$  分别表示软模膨胀法制备单向板的纤维体积分含

表 1 软模膨胀法制备单向板的基本性能参数

Tab. 1 Properties of the unidirectional laminate fabricated by expandable mould

材料	$V_f$	$E_x$ (GPa)	$E_y$ (GPa)	$G_{xy}$ (GPa)	$\nu_{xy}$
T300/E-51	53%	110.5	10.3	4.5	0.32

量, 纵向压缩模量, 横向压缩模量, 剪切模量和主泊松比。

\* 收稿日期: 2004-10-10

基金项目: 国家 863 高技术资助项目 (2002AA724052)

作者简介: 彭超义 (1977-), 男, 博士生。

## 1 碳/环氧管件压缩实验

### 1.1 管件压缩试样的制备

#### (1) 原材料和试验设备

E-51 环氧树脂: CYD-128, 岳阳石油化工总厂环氧树脂厂; 固化剂: 三氯化硼单乙胺, 二乙烯三胺; 碳纤维: T-700, 12K, 日本东丽公司。

万能试验机: WDW-100, 长春实验机厂。

#### (2) 成型工艺和试样制备

采用内软模膨胀法成型工艺制备试样<sup>[6]</sup>。固化条件为: 90℃固化 40min, 120℃固化 90min, 160℃固化 3h。所制备的管件两端各锯除 100mm, 取中间段制备压缩试样。压缩试样端面打磨平整并且确保两个端面与轴线垂直。压缩试样尺寸为: 内径 42mm, 外径 50mm, 长度 100mm。

### 1.2 轴压破坏试验

采用万能力学试验机进行轴压试验。管件试样置于力学试验机两平行板之间进行加载, 加载试验板平整光洁, 安装球铰调整上下加载板的平行程度, 试样的轴线与试验机上下压板的中心对齐, 避免试样受力不均匀, 以保证所施加载荷为纯轴向载荷。加载速度为 5mm/min, 均匀连续加载至试样破坏<sup>[7]</sup>。

## 2 碳/环氧管压缩试样的有限元建模

### 2.1 压缩试样的几何参数和铺层方式

如图 2 所示, 压缩试样内径为 42mm, 外径为 50mm, 管件壁厚为 4mm, 高度为 100mm。考虑到管件只承受轴向载荷, 采用无纬带进行轴向和环向铺层, 铺层方式见表 2。表 2 中  $90^\circ$  表示环向铺层,  $0^\circ$  表示轴向铺层, 下标  $n$  表示轴向铺层数,  $n$  依次取 0, 1, ..., 10, 则轴向铺层的含量为 0, 10%, ..., 100%。

表 2 无纬带铺层性能和铺层方式

Tab. 2 Properties and layer sequences of the tape plies

面密度 ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	单层厚度 (mm)	铺层数目	铺层方式
300 (铺 10 层)	0.4	10	$90^\circ_{5-(n-1)/2}/0^\circ_n/90^\circ_{5-(n+1)/2}$ ( $n$ 为奇数, 非对称铺层)
			$90^\circ_{5-n}/0^\circ_n/90^\circ_{5-n}$ ( $n$ 为偶数, 对称铺层)
150 (铺 20 层)	0.2	20	$90^\circ_{10-n}/0^\circ_{2n}/90^\circ_{10-n}$ (对称铺层)

### 2.2 边界条件和有限元建模

把碳/环氧管试样置于力学性能试验机两平行板之间进行压缩试验, 如图 1 所示。因此, 建立碳/环氧管压缩试样有限元模型时, 边界条件为试样的下端截面采用固支约束, 压缩载荷均匀施加于试样上端截面, 如图 2 所示。为了便于不同铺层方式管件试样的剪应力比较, 压缩载荷设为一适当的定值, 本文取压缩载荷为 116kN, 即试样的平均轴向应力为 200MPa。建立直径为 50mm, 高度为 100mm 的圆柱壳, 表示碳/环氧压缩试样的实体模型。采用 ANSYS 7.0 元素库中线性层合单元 Shell99 对实体模型进行网格划分。由于圆柱壳为规则几何面, 为了精确控制网格划分后节点位置, 使每种铺层方式的有限元模型网格划分精确一致, 采用四边形单元 (quadrilaterals) 对圆柱壳实体模型进行对应网格划分 (mapped), 圆柱壳高度方向划分 25 个单元, 环向划分 100 个单元, 共划分 2500 个单元, 7700 个节点, 如图 2 所示。

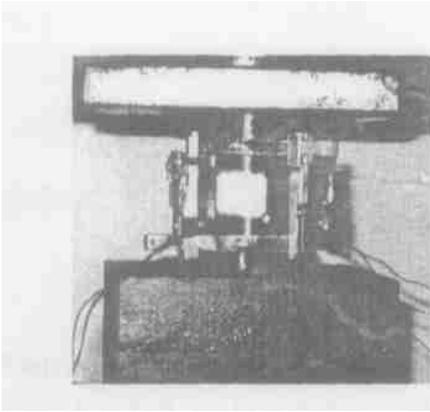


图1 碳/环氧管压缩试验

Fig. 1 Compression test for carbon/ epoxy tube

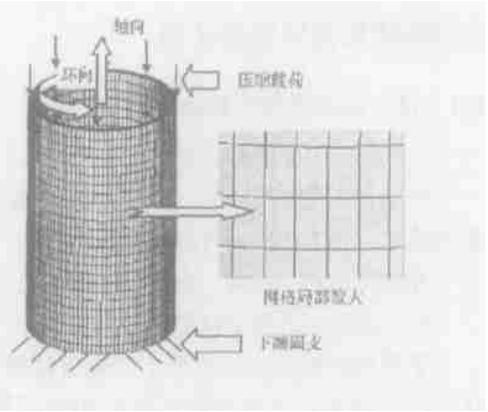


图2 有限元网格划分及约束条件示意图

Fig. 2 FEA meshing and boundary conditions

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 有限元计算结果分析

采用表1中的材料参数和表2中的铺层方式计算各铺层方式的环向层间剪应力和轴向层间剪应力,列于表3中,其中, $S_{xy}$ 表示最大环向层间剪应力, $S_{xz}$ 表示最大轴向层间剪应力。

表3 不同铺层方式的环向层间剪应力和轴向层间剪应力

Tab. 3 Hoop and axial interlaminar shearing stresses for different ply sequences

轴向铺层含量(%)	$S_{xy}$ (MPa)		$S_{xz}$ (MPa)	
	10层	20层	10层	20层
0	8.53	8.53	10.80	10.80
10	5.07	4.36	5.63	5.67
20	3.61	3.61	4.00	4.00
30	7.91	3.84	3.19	3.23
40	3.77	3.76	2.83	2.83
50	7.66	3.58	2.60	2.63
60	3.42	3.42	2.54	2.54
70	6.88	3.39	2.50	2.54
80	3.63	3.63	2.63	2.63
90	6.42	4.50	2.80	2.87
100	0.81	0.81	3.49	3.49

采用单层厚度为0.4mm的无纬带铺层,管件铺层数为10层,当轴向铺层数为奇数时,为不对称铺层;采用单层厚度为0.2mm的无纬带铺层,管件铺层数为20层,全部为对称铺层。轴向铺层含量对环向层间剪应力和轴向层间剪应力的影响分别见图3和图4。对于对称铺层,随着轴向铺层含量的增加,环向层间剪应力和轴向层间剪应力总体呈下降趋势,只是在轴向铺层含量大于80%以后,环向层间剪应力和轴向层间剪应力都略有上升趋势,在铺层全部为轴向铺层时,环向层间剪应力达到最小值,而轴向层间剪应力反而有了较明显的增加,所以对于对称铺层,轴向铺层含量在70%~80%(即轴向铺层与环向铺层比例为7:3~8:2)时,可以有效降低环向层间剪应力和轴向层间剪应力。对于非对称铺层,由图3可见,铺层的不对称将导致环向剪应力显著增加,增加幅度最高可达到对称铺层环向层间剪应力的1.14倍。而图4表明铺层的不对称对轴向层间剪应力基本上没有影响。

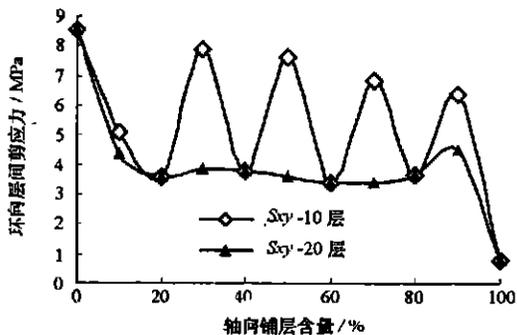


图3 环向层间剪应力与轴向铺层含量关系  
Fig. 3 Hoop interlaminar shearing stresses vs. axial plies content

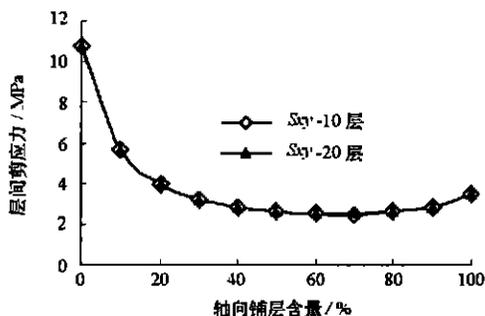


图4 层间剪切应力与轴向铺层含量关系  
Fig. 4 Axial interlaminar shearing stresses vs. axial plies content

### 3.2 实验结果分析

直接测量压缩管件的层间剪应力很困难。但是,在压缩条件下,本文的压缩管件试样的破坏模式主要为层间剪切破坏,因此,根据试样压缩破坏强度的大小,可以反推出层间剪应力的大小。由于管件试样都采用同种工艺制备,其层间剪切强度应该基本一致,压缩强度越高,则表明在相同的压缩载荷下,层间剪应力越小。不同铺层方式管件试样压缩强度见表4。从表4可见,对称铺层管件比相同轴向铺层含量的压缩强度明显要高,而且轴向铺层含量为80%时,压缩强度最高,表明铺层的不对称性导致层间剪应力偏高,并且轴向铺层含量为80%时,管件的压缩性能最好,这与有限元分析结果一致。

表4 几种典型铺层方式的管件压缩强度

Tab. 4 Compression strength of the tubes with several typical stacking styles

轴向铺层含量	90%		80%		70%	
对称铺层	是	非	是	是	非	
压缩强度(MPa)	581	520	607	596	492	

## 4 结语

采用大型通用有限元分析软件 ANSYS7.0 对膨胀软模法制备的不同铺层方式碳/环氧管件试样进行分析,并通过实验进行了验证,表明铺层的轴向铺层和环向铺层的比例为 7:3~8:2 时,可以有效降低碳/环氧管的最大环向层间剪应力和轴向层间剪应力;铺层的不对称性可导致最大环向层间剪应力显著增大,最大可增加 1.14 倍,而对最大轴向层间剪应力基本上没有影响。

### 参考文献:

[1] 彭超义, 杜刚, 曾竟成, 等. 大载荷下空间桁架结构主承力用碳/环氧推力管的重量优化设计[J]. 玻璃钢复合材料, 2003, (6): 33.  
 [2] 彭超义, 曾竟成, 肖加余, 等. 航天器发动机推力支架桁架结构的有限元分析与优化设计[J]. 宇航材料工艺, 2003, (6): 21.  
 [3] Spannoli A, Elghazouli A Y, Chrysanthopoulos M K. Numerical Simulation of Glass-reinforced Plastic Cylinders under Axial Compression[J]. Marine Structures, 2001, (14): 353- 374.  
 [4] Meyer-Piening H-R, Fashad M, Geier B, et al. Buckling Loads of CFRP Composite Cylinders under Combined Axial and Torsion Loading-experiments and Computations[J]. Composite Structures, 2001, 53: 427- 435.  
 [5] Agrawal A, Jar P-Y B. Analysis of Specimen Thickness Effect on Interlaminar Fracture Toughness of Fibre Composites Using Finite Element Models [J]. Composites Science and Technology, 2003, 6: 1393- 1402.  
 [6] 杜刚, 曾竟成, 张长安, 等. 硅橡胶热膨胀模塑成型法制备碳/环氧复合材料管研究[J]. 纤维复合材料, 2003, (2): 26.  
 [7] 沃丁柱, 李顺林, 王兴业, 等. 复合材料大全[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 459.