

碳纤维层合板有限元分析

贺平, 刘金勇

(中国船舶重工集团公司第七一〇研究所, 湖北宜昌 443003)

摘要 碳纤维材料作为一种优良的复合材料,越来越广泛地应用于水下攻防领域。主要研究了有限元法对碳纤维层合板的分析。首先介绍层合板理论,基于该理论对碳纤维层合板模型进行理论分析,然后利用大型有限元软件 ANSYS 对同一模型进行有限元仿真计算。最后,对二者计算结果进行比较,讨论有限元法对碳纤维层合板的强度计算的可行性,为工程设计运用提供参考。

关键词 碳纤维;层合板理论;ANSYS 分析

中图分类号 U664.1 **文献标识码** A

Finite Element Analysis of Carbon Fiber Laminate

HE Ping, LIU Jinyong

(No. 710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443003, China)

Abstract As an excellent composite material, carbon fiber is more and more widely used in undersea warfare. This paper studies the finite element methods for the analysis of carbon fiber laminate. Firstly, the laminate theory is introduced, and then the carbon fiber laminate model is analyzed based on this theory. Next, the same model is carried out with finite element simulating calculation using ANSYS. Finally, the calculation results are compared with the theoretical results, and the feasibility of the finite element method for the strength calculation of carbon fiber laminate is discussed, which could provide reference for engineering design and application.

Key words carbon fiber; laminate theory; ANSYS analysis

0 引言

海洋工程水下装备是我国智慧海洋建设的重要组成部分,是国防建设的重要组成部分。在水下攻防等领域,发达国家凭借其技术优势,引领着水下装备的不断变革。水下装备蓬勃发展以及水下装备基础技术的不断突破正推动着水下攻防领域作战模式的转变。

工程上把 2 种或 2 种以上的材料在宏观尺度上组成的新材料称为复合材料。复合材料是一种不均匀的材料,复合材料在宏观上呈现出各向异性

的特性。复合材料不仅保持了组成材料自身原有的一些优良性能,而且能够彼此补偿,明显改善或突出一些特殊性能,成为一种新型材料。通过改变组成材料品种或比例,可以得到不同品种和性能的复合材料。

复合材料按增强体几何形态可分为 4 类,即纤维增强复合材料、颗粒增强复合材料、薄片增强复合材料和叠层复合材料。其中,纤维增强复合材料运用最为广泛^[1]。

碳纤维材料作为一种优良的复合材料,由于它具有较高的比强度、比刚度、耐腐蚀性、抗疲劳性以

及良好的可设计性,已经越来越多地应用于水下攻防领域^[2]。因此,研究和掌握碳纤维的力学特性,对于推动我国水下攻防领域的研究与发展具有重要的意义。

1 层合板理论

层合板是由 2 层以上的单层板粘合在一起成为整体的受力结构元件,各单层的材料、厚度和弹性力学特性可以互不相同。适当地改变这些参数,就可以设计出最有效地承受各种载荷的结构元件。

1.1 单层板弹性特征

单层板是层合结构的基本单元,单层板是指单向纤维或编织纤维在基体中呈扁平形式的层片。单层板的力学分析是层合结构力学分析的基础。

单层板属于宏观各向同性体或正交各向异性体,其 3 个弹性主方向分别为纤维纵向 L ,面内垂直于纤维的横向 T 和垂直于板平面的法向 N ^[3],如图 1 所示。另外,单层板厚度很小,与法线方向 N 有关的应力分量与面内应力分量相比很小,可以忽略不计,因此对单层板的分析可以简化为二维平面问题。

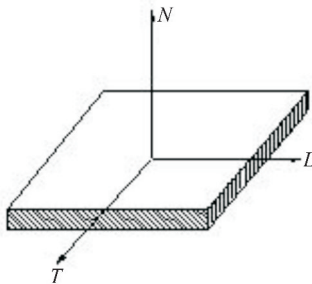


图 1 单层板主方向

Fig. 1 Main direction of lamina

单层板内任一点处弹性主方向上的应力、应变表示为

$$\begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_{LT} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中 Q_{11} 、 Q_{12} 、 Q_{22} 、 Q_{66} 为弹性主方向刚度系数,其大小与材料 3 个方向的弹性模量、剪切模量和泊松比有关。

单层板内任一点处任意方向上的应力、应变可

表示为

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中 \bar{Q}_{11} 、 \bar{Q}_{12} 、 \bar{Q}_{16} 、 \bar{Q}_{21} 、 \bar{Q}_{22} 、 \bar{Q}_{26} 、 \bar{Q}_{66} 为任意方向刚度系数,其大小与材料 3 个方向的弹性模量、剪切模量、泊松比和纤维纵向 L 轴角度有关。

1.2 层合板弹性特征

层合板是由多个单层板粘结而成的,但由于各单层板很薄,层合板的总厚度与其它尺寸相比较仍然小得多,在整体上可把层合板视作一块非均质的各向异性薄板。

层合板的力学性能既取决于组成的各单层板的力学性能和厚度,又取决于铺层方向和序列。层合板与均质材料结构不同,层合板的分析必须立足于对每一单层的分析。

分析层合板的弹性性质,以下面的基本假设为基础^[4-6]:

- 1) 层间变形一致假设:层合板各单层之间粘合牢固,层间变形一致,无相对位移;
- 2) 直法线不变假设:变形前垂直于板中面的直线在板变形后仍保持垂直,且长度不变;
- 3) $\sigma_z = 0$ 假设:在厚度方向上的正应力与其他应力相比很小,可忽略不计;
- 4) 单层平面应力状态假设:层合板中各单层都可近似地认为其为平面应力状态。

根据以上假设,层合板中任一点的应变,可以用中面上相应点的面内应变和弯曲应变表示出来。还能得出,层合板的应变沿厚度是线性变化的。由于引入直法线不变假定,使层合板的变形分析简化为中面的变形分析。层合板沿厚度方向具有非均质性,应力在铺层之间不一定连续,但在每一单层内,应力沿厚度方向是连续函数,故可简化为分层积分再求和的形式:

$$\{N\} = \sum_{k=1}^k \int_{z_{k-1}}^{z_k} \{\sigma\} dz \quad (3)$$

层合板的第 k 层的应力可用中面的应变和刚度矩阵为

$$\{\sigma\}_k = [\bar{Q}]_k \{\varepsilon\}_k \quad (4)$$

根据层合板的实际受力情况,通过层合板的应力-应变关系,得到中面的应变,由中面应变与单层应变的关系,通过坐标变换求得单层应变,再通过单层的应力-应变关系就可以得到各单层的应力分布情况。

2 层合板理论分析

2.1 计算模型

碳纤维制成的正交铺设对称层合板 [90/0/45₂],共 8 层,每层厚度为 0.125 mm,沿板面方向作用内力 $N_x = 20 \text{ MPa}$, $N_y = 10 \text{ MPa}$,施加于互相垂直的两边,计算各层正轴应力 $[\sigma^{(\theta)}]$ 和各层偏轴应力 $[\sigma^{(\theta)}_1]$ 。计算模型如图 2 所示。

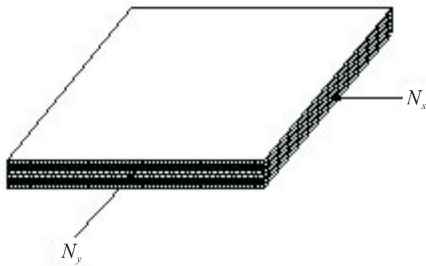


图 2 计算模型

Fig. 2 Computational model

碳纤维材料属性如表 1 所示。

表 1 碳纤维材料属性

Table 1 Attribute of carbon fiber materials

弹性模量/GPa			泊松比			剪切弹性模量/GPa		
E_1	E_2	E_3	μ_{12}	μ_{23}	μ_{13}	G_{12}	G_{23}	G_{13}
76.3	43.6	10.9	0.024	0.172	0.32	4.8	4.8	4.8

2.2 理论解析法计算

根据层合板刚度理论进行解析计算,计算过程如下。

1) 计算各单层板的刚度矩阵 $[Q_{(\theta)}]$, 得出层合板刚度矩阵 $[A]$:

$$[A] = \frac{1}{8} \times (2[Q_{(90)}] + 2[Q_{(0)}] + 4[Q_{(45)}]) \quad (5)$$

2) 计算层合板中面应变 $[\varepsilon]$:

$$[\varepsilon] = [A]^{-1} [N] \quad (6)$$

3) 计算各单层正轴应变 $[\varepsilon^{(\theta)}]$, 各单层正轴应力 $[\sigma^{(\theta)}]$, 各单层偏轴应力 $[\sigma^{(\theta)}_1]$:

$$[\varepsilon^{(\theta)}] = [T] * [\varepsilon] \quad (7)$$

$$[\sigma^{(\theta)}] = [Q_{(\theta)}]^{-1} [\varepsilon^{(\theta)}] \quad (8)$$

$$[\sigma^{(\theta)}_1] = [Q_{(\theta)}]^{-1} [\varepsilon] \quad (9)$$

式中: $[N]$ 为施加内力; $[T]$ 为坐标变换矩阵。通过计算,得到的各单层板正轴应变 $[\varepsilon^{(\theta)}]$, 各单层正轴应力 $[\sigma^{(\theta)}]$, 各单层偏轴应力 $[\sigma^{(\theta)}_1]$, 详见表 2。

表 2 理论解析法计算结果

Table 2 Computational results of theoretical analytic method

铺层偏角 / (°)	正轴应力/MPa			偏轴应力/MPa		
	σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_{x1}	σ_{y1}	τ_{xy1}
90	-8.66	-17.55	0.58	-17.55	-8.66	0.58
0	-30.63	-5.13	0.58	-30.63	-5.13	0.58
45	-15.09	-13.91	-1.40	-15.90	-13.10	-0.58

3 层合板有限元分析

3.1 有限元模型建立

仿真目的模型为一个平面应力问题, ANSYS 有专门计算复合材料的 Shell99 单元, 是一种八节点三维壳体单元, 每个节点有 6 个自由度, 即单元坐标系中的每个节点沿 x, y, z 3 个方向移动, 绕 x, y, z 3 个方向转动。线性壳单元 Shell99 最多允许定义 250 层的等厚度材料层, 适用于薄型到中等厚度的板和壳结构的分析^[7]。为方便建模, 建立一个边长 1 m 的正方形, 层合板总厚度为 0.001 m, 内力 $N_x = 20 \text{ MPa}$, $N_y = 10 \text{ MPa}$ 等效为 $N_{x1} = 2 \times 10^4 \text{ N/m}$, $N_{y1} = 1 \times 10^4 \text{ N/m}$ 的线均布载荷施加。

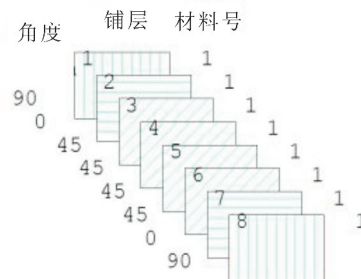


图 3 单元铺层

Fig. 3 Ply of element

根据层合板各层分布情况, 建立层合板单元层合结构, 并赋值材料属性^[8]。层合板单元层合铺层结构见图 3, 有限元模型如图 4。

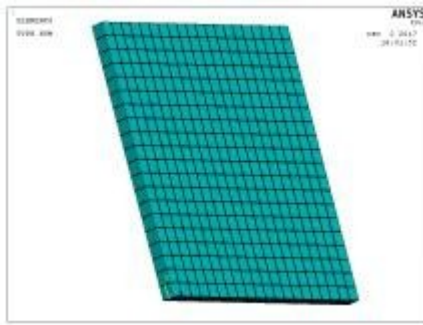


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

3.2 计算结果

计算完成,通过后处理器设置,输出各层应力结果。可以看到,各单层内正轴应力分布和偏轴应力分布是均匀的,与理论分析一致。

输出默认坐标系为偏轴坐标系,通过后处理,可以直接读出各层各向偏轴应力和偏轴应变^[9]。限于篇幅,仅列出部分计算结果,层 1(90°层)*x* 向偏轴应力云图见图 5 所示。

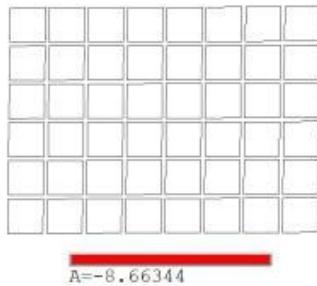


图 5 *x* 向偏轴应力

Fig. 5 Off-axis stress in direction *x*

改变结果坐标系,通过后处理,可以直接读出各层各向正轴应力和正轴应变。限于篇幅,仅列出部分计算结果,层 3(45°层)*x* 向正轴应力云图见图 6 所示。

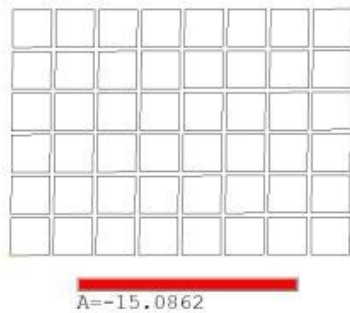


图 6 *x* 向正轴应力

Fig. 6 Normal-axis stress in direction *x*

通过有限元仿真计算,得出的各向各层正轴及偏轴应力应变见表 3。

表 3 有限元法计算结果

Table 3 Computational results of finite element method

铺层偏角/(°)	正轴应力/MPa			偏轴应力/MPa		
	σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_{x1}	σ_{y1}	τ_{xy1}
90	-8.67	-17.56	0.58	-17.56	-8.67	0.58
0	-30.64	-5.14	0.58	-30.64	-5.14	0.58
45	-15.09	-13.92	-1.41	-15.91	-13.11	-0.58

4 结果分析

4.1 结果比较

将理论解析法和有限元方法分别对碳纤维层合板进行比较,结果见表 4。

表 4 结果比较

Table 4 Comparison of results

铺层偏角/(°)	正轴应力/MPa			偏轴应力/MPa		
	σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_{x1}	σ_{y1}	τ_{xy1}
理论	-8.66	-17.55	0.58	-17.55	-8.66	0.58
90 有限元	-8.67	-17.56	0.58	-17.56	-8.67	0.58
误差(100%)	0.12	0.06	0	0.06	0.12	0
理论	-30.63	-5.13	0.58	-30.63	-5.13	0.58
0 有限元	-30.64	-5.14	0.58	-30.64	-5.14	0.58
误差(100%)	0.03	0.19	0	0.03	0.19	0
理论	-15.09	-13.91	-1.40	-15.90	-13.10	-0.58
45 有限元	-15.09	-13.92	-1.41	-15.91	-13.11	-0.58
误差(100%)	0	0.07	0.71	0.06	0.08	0

4.2 结论

基于以上理论解析法和有限元法计算结果比较,误差最大为 0.71%,认为用有限元方法对碳纤维层合板进行强度分析是可行的,而且精度很高。

5 结束语

本文利用解析法和有限元法分别对碳纤维层合板进行分析。通过对二者计算结果进行比较,可以得到以下结论:

- 1) 经典层合板理论,该理论的核心在于将单

(下转第 62 页)