

基于均匀化方法的缝纫层压板拉伸弹性模量有限元预测

黄涛 矫桂琼 高峰

(西北工业大学力学与土木建筑学院,西安 710072)

文 摘 利用均匀化方法研究缝纫复合材料层压板的弹性性能,给出了相应的数学分析模型。建立了有限元分析的单胞模型,并进行求解。计算结果表明,利用这种半解析模型可以得到缝纫层压板的弹性模量的上下限,其平均值与实验结果平均值吻合得很好。

关键词 均匀化方法,缝纫层压板,单胞模型,有限元分析

Predicting Method for Tensile Modulus of Stitching Laminate by Finite Element Analysis

Huang Tao Jiao Guiqiong Gao Feng

(School of Mechanics and Civil Construction, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract The basic elastic properties of stitching laminate are studied by homogenization method. Two cell models are built up to predict tensile modulus of stitching laminate by using finite element analysis method and the upper and lower limits of the tensile modulus can be obtained with. The average of the upper and lower limits are well agreed with average experimental results.

Key words Homogenization method, Stitching laminate, Cell model, Finite element analysis (FEA)

1 引言

目前缝纫对层压板面内性能的影响尚无准确预报理论。Mouritz研究了50多项不同缝合复合材料层压板的实验数据,发现其出入较大^[1-2]。对缝纫复合材料层压板力学分析常采用修正的层压板理论,计算过程中有两种处理方法。第一种以实验为基础,采用经典层合板理论,把缝合对层压板刚度的影响仅仅归结为单向层刚度的改变,把缝纫复合材料看成一种新的材料,通过实验测量单向板性能,从而推出层压板刚度性能。此方法可以简化为折减法,即把未缝纫板性能乘以折减系数,得到缝纫板性能。

第二种是依赖几何分析的理论解法,如桂良进等人简化纤维与缝线相交的几何形态,按照平均刚度法建立了缝纫单层板有效弹性常数的分析模型^[3];魏玉卿等从分析缝线纤维弯曲几何特征入手,通过有限元分析得到缝合层压板面内弹性性能^[4]。

缝纫复合材料层压板微观结构和制作工艺与传统预浸带固化层压板结构大不相同,因而用已有的经典方法分析其基本特性不能完全适用,需要一种新的既能反映其微观非均匀性又能体现其宏观结构均匀周期变化特点的分析理论。20世纪70年代法

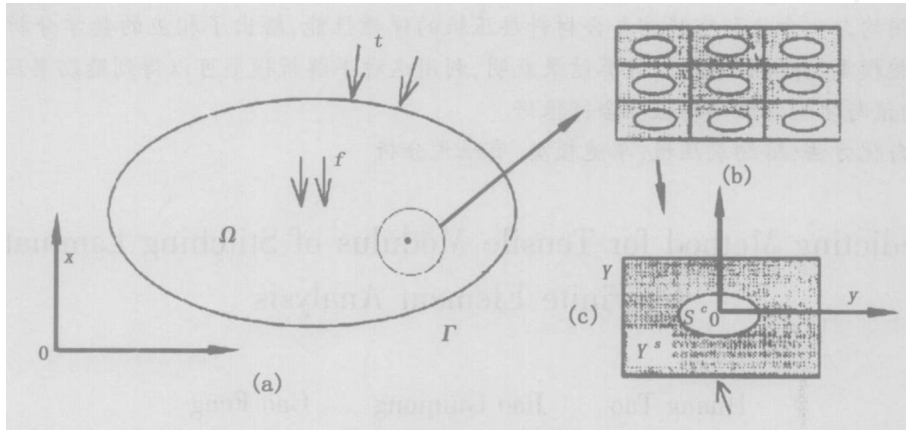
收稿日期:2005-09-27;修回日期:2005-11-10

基金项目:自然科学基金(10572116);航空基金(04B53013);西北工业大学青年科技创新基金资助

作者简介:黄涛,1976年出生,讲师,主要从事复合材料结构力学的研究

国科学家将数学均匀化方法 (Homogenization Method) 引入周期性结构研究中^[5], 近年该方法已成为分析夹杂、纤维增强复合材料、混凝土材料等效模量的常用手段之一。

本文利用均匀化方法研究缝纫复合材料层压板的弹性性能, 给出了相应的数学分析模型, 进而结合有限元分析方法求解, 利用半解析模型预测了缝纫层压板的弹性性能。



(a) 宏观结构 (b) 细观结构及其周期性 (c) 单胞

图 1 复合材料宏观结构周期性示意图^[6]

Fig 1 Periodicity of composites structure

结构的周期性和单胞如图 1 (b) 和 (c) 所示。在体积力 f 和表面力 t 作用下的应力和位移在宏观位置 x 的小领域 (领域, $0 \ll 1$) 内会有很大的变化。因而可以认为: 力学性能和外力响应量可以表征为宏观尺度 x 和细观尺度 $y = x/\epsilon$ 两种坐标尺度的函数。因此, 这些力学性能和外力响应对细观坐标 $y = x/\epsilon$ 也具有周期性, 即

$$g(x, y + Y) = g(x, y) \quad (1)$$

式中, Y 表示周期函数的周期, 此时任意函数对 x 的微分为

$$\frac{\partial g(x)}{\partial x_i} = \frac{\partial g(x, y)}{\partial x_i} + \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{\partial g(x, y)}{\partial y_i} \quad (2)$$

对复合材料宏观域, 其外边界为 ∂ 。

定义集合

$$\begin{aligned} V_x &= \{v(x) \mid x \in \Omega\} \\ V_Y &= \{v(y) \mid y \in Y, v(y + Y) = v(y)\} \\ V_{xy} &= \{v(x, y) \mid x \in \Omega, y \in Y, v(x, y + Y) = v(x, y)\} \end{aligned} \quad (3)$$

不考虑温度影响, 则用虚功原理表示的弹性控

2 均匀化理论基本原理

图 1 为复合材料宏观结构, 可认为是由一系列单胞在空间排列组成。单胞尺度相对于结构宏观尺寸来说是很小的量, 复合材料的宏观性质在空间是变化的, 但在某点单胞尺度的领域内, 这种变化是极微小的。因此, 从宏观结构中取出一个微元来观察, 可以认为组成复合材料的单胞是周期性排列的。

制方程为

$$E_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial v_j}{\partial x_j} dV - \int_{\partial} f_i v_i dV - \int_{\partial} t_i v_i ds = 0, \quad \forall v \in V \quad (4)$$

式中, V 为定义在 Ω 上足够光滑的函数集合。

用摄动参数法^[6]可解得定义于单胞上的细观均匀化问题

$$\left[E_{ijkl} - E_{ijkl} \frac{\partial}{\partial y_l} \right] \frac{\partial v_j}{\partial y_j} dY = 0, \quad \forall v \in V_Y \quad (5)$$

及宏观均匀化问题

$$E_{ijkl}^H \frac{\partial u_k^0}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial v_j}{\partial x_j} dV - \int_{\partial} f_i v_i dV - \int_{\partial} t_i v_i ds = 0, \quad \forall v \in V \quad (6)$$

式中

$$E_{ijkl}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left[E_{ijkl} - E_{ijmn} \frac{\partial}{\partial y_m} \right] dY \quad (7)$$

式中, Y 为单胞区域, 类比式 (4) 和式 (6) 可知: E_{ijkl}^H 即复合材料的等效弹性常数张量。

3 缝纫层压板刚度预测模型

上述基于均匀化方法的材料弹性常数 E_{ijkl}^H 求解方法,其关键是求解式(5)细观均匀化问题。此问题解析法求解较困难,因而需要简化模型,讨论适用于工程实际的半解析解法。

首先假设缝纫复合材料层压板是由若干含缝线的单层板构成,如图2所示,其分析可分三步。

(1)首先纤维和基体复合,其单胞可以看作含圆柱形纤维的基体立方柱体,圆柱体在立方体中的体积分数由材料纤维体积分数确定。由此就可以用均匀化方法计算不含缝线复合材料单层板的等效弹性模量(与文献[7]的假设相同)。

(2)依据缝纫工艺,认为缝线由干态缝线纤维和树脂复合而成,其单胞模型可看作含圆柱体纤维的圆柱体,外层圆柱体按缝纫孔直径确定,缝线等效弹性模量同样按照均匀化方法确定。

(3)将第1步已均匀化的复合材料单层板按层压板理论合成层压板作为基体材料,将第2步均匀化的浸树脂缝线作为沿厚度方向的增强纤维。其单胞模型可看作含圆柱形纤维的立方柱体,立方体几何尺寸由层压板厚度、缝纫针距和行距确定。由此就可以利用有限元分析方法计算缝纫复合材料层压板的等效弹性模量。



图2 缝纫层压板二级单胞模型

Fig 2 Cell model of stitching laminate

4 有限元分析及实验

将上述缝纫层压板单胞模型,划分网格进行二维有限元分析,即可计算缝纫层压板面内等效弹性模量的数值解。实验观察发现:缝线与层压板的界面结合强度影响层压板整体的刚度,因此考虑理想界面结合情况:缝线与层压板紧密结合,即完整的缝纫层压板单胞模型,为模型1,如图3所示。

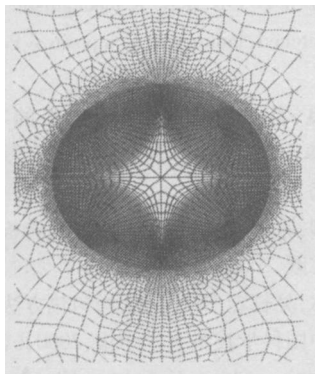


图3 有限元单胞模型1网格图

Fig 3 Cell model 1 for FEA

考虑到缝线与层压板界面结合不好的极限情况:缝线与层压板完全脱开,不承受载荷,即等同于宇航材料工艺 2006年第4期

没有缝线只有缝线孔的情况,为模型2,如图4所示。

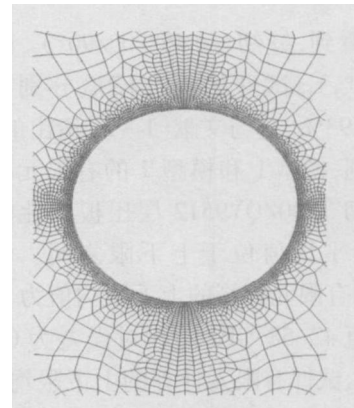


图4 有限元单胞模型2网格图

Fig 4 Cell model 2 for FEA

利用这两种模型即可以用有限元方法分析计算,确定两种极限情况下缝纫复合材料层压板等效拉伸弹性模量。

层压板材料采用国产 T300/QY9512 复合材料,铺层为 $(\pm 45^\circ / 0^\circ / 90^\circ)_{2S}$ 和 $(\pm 45^\circ / 90^\circ)_{2S}$ 两种,缝线材料为 Kevlar49;使用对称边界条件,单向位移加载,用通用有限元程序 MSC Nastran 分别计算两种

模型下的拉伸弹性模量。

为验证有限元计算的结果,进行了缝纫层压板单向拉伸实验,试件材料及缝纫参数与有限元计算模型相同,实验分缝纫和未缝纫两类,每类试件 5

组,每组试件 5个。实验在 Instron 1196电子万能试验机上进行。

图 5给出了缝纫试件的等效弹性模量的两种模型有限元模拟值和实验值的比较。

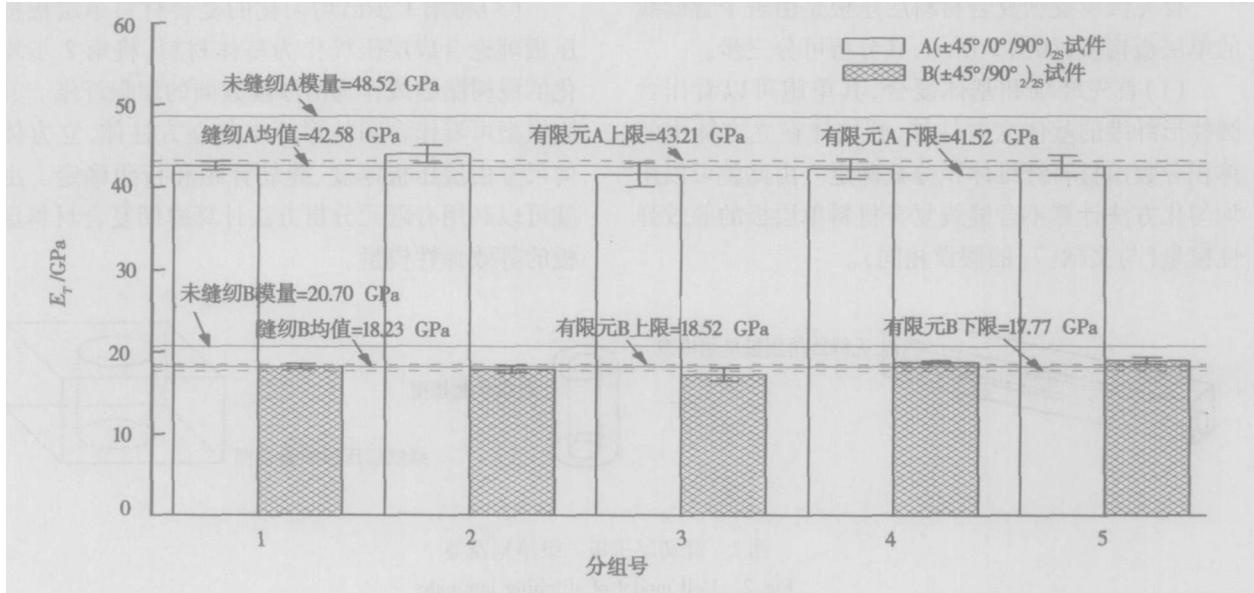


图 5 缝纫层压板拉伸实验结果与有限元计算结果

Fig 5 Experimental and FEA result

可以看到,缝纫 ($\pm 45^\circ/90^\circ$)₂₅试件和缝纫 ($\pm 45^\circ/90^\circ$)₂₅试件的弹性模量分别下降了 12.24%和 11.93%,这与文献 [1~2]给出的结论一致。还可以看到,模型 1和模型 2的有限元模拟计算结果为缝纫 T300/QY9512层压板弹性模量的上下限值,实验平均值位于上下限之间。 ($\pm 45^\circ/90^\circ$)₂₅试件有限元计算的上下限均值为 42.37 GPa,与实验均值 42.58 GPa的相对误差为 0.52%; ($\pm 45^\circ/90^\circ$)₂₅试件有限元计算的上下限均值为 18.15 GPa,与实验均值 18.23 GPa的相对误差为 0.44%。对比表明本文的有限元模型可以有效地预测缝纫层压板的弹性模量,并可确定其上下限。

5 结论

利用数学均匀化理论,讨论了缝纫复合材料层压板弹性模量预测的理论和方法。建立了计算缝纫复合材料层压板的等效弹性模量的有限元分析模型,初步解决了缝纫层压板弹性性能预测问题。两种有限元模型预测计算的结果为缝纫层压板的弹性模量的上下限,其均值与实验均值的误差很小,此有限元模

型可以有效地预测缝纫层压板的弹性模量。

参考文献

- 1 Mouritz A P, Leong B K H. A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites Composites Part A, 1997; 28 (1): 1~2
- 2 Mouritz A P, Cox B N. A mechanistic approach to the properties of stitched laminates Composites Part A, 2000; 31 (1): 1~27
- 3 桂进良, 范子杰等. 缝纫层合板的本构关系研究 (I)——缝纫单层板有效弹性常数分析. 复合材料学报, 2002; 19 (1): 95~100
- 4 魏玉卿, 张俊乾. 缝纫复合材料层合板面内弹性模量分析. 力学与实践, 2005; 27: 36~38
- 5 冯森林, 吴长春. 基于三维均匀化方法的复合材料本构数值模拟. 中国科学技术大学学报, 2000; 6 (30): 693~699
- 6 Liu Shutian, Cheng Gengdong Homogenization method of stress analysis of composite structures ACTA Mechanica Sinica, 1997; 3 (29): 306~313
- 7 汪海. 复合材料缝合结构静强度研究. 沈阳飞机设计研究院 (博士学位论文). 2001

(编辑 吴坚)

宇航材料工艺 2006年 第4期