

复合材料层板饱和裂纹间距的 试凑法(cut-and-try)

茆会勇¹ 蒋咏秋² 叶林²

(1996年8月3日收到, 1997年3月3日收到修改稿)

摘 要

本文首次通过三维有限元法计算分析出 90° 层中横向裂纹的饱和间距值, 为预测饱和裂纹间距提供了一条新途径。

关键词 横向裂纹 饱和裂纹间距 损伤 应力

一、引 言

横向裂纹起裂于 90° 层中, 并扩展到层板的整个宽度上。随着单调增加的荷载作用或者循环荷载的作用, 层中横向裂纹宽度不断增长, 这一过程一直继续到裂纹达到饱和分布为止。横向裂纹的出现, 是层板损伤开始的重要先兆, 其发展过程是层板损伤累积过程的主要阶段之一。

对于横向开裂, 最重要的发现是特征损伤状态(characteristic damage state 简称CDS)。CDS是由层板一些层中相邻裂纹之间的距离接近均匀而使裂纹达到饱和分布所构成的损伤状态。这一图案可以用剪切滞后的分析方法预计到。

对 $[0/90]_n$ 层板, Steif提出了一个剪切滞后分析方法, 其中假设横向层中的纵向位移按抛物线分布, 得出了层板纵向刚度减小—平均裂纹密度的理论曲线, 与实验结果基本一致^[1]。Z. Hashin^[2]基于最小余能原理, 用变分法推导出 $[0_m/90_n]_s$ 系列层板的纵向刚度—平均裂纹密度的理论公式, 并与实验进行了比较, 结果较前者更进一步。

A. S. D. Wang等人对首先发生的 90° 层横向裂纹, 从理论上解释了裂纹发生发展规律, 并结合统计的分析方法得出与实验曲线相当吻合的裂纹—荷载曲线^[3-4]。

90° 层中横向裂纹的增长, 实际上仍是一个基体裂纹起始的过程, 这一过程一直继续到裂纹饱和分布为止。 90° 层中的荷载由相邻层承担, 但随着远离裂纹自由面, 90° 层中的应力 σ_x 又不断增大(距离的大小取决于开裂板层和相邻层的刚度)。当这一应力, 在远离裂纹的某个距离上达到使基体开裂需要的应力水平时, 第二个裂纹就将形成。这一过程随着荷载增加而继续下去, 直到裂纹发展到沿板层长度得到一个较规则的间距为止。这一间距就是饱和

1 安徽建筑工业学院建筑工程系, 合肥 230022

2 西安交通大学建工与力学学院工程力学系, 西安 710049

裂纹间距。如图 1 所示。

Reifsnider, O'Brien, Bader 等人用剪切滞后分析方法精确地预测了一些层板的饱和裂纹间距^[6]。其中假设, 从现有裂纹起到某些位置(这些位置是正应力达到稳定位置时的位置)的最小距离, 可以用来表示裂纹间距。由于这一距离是所有可能距离中最小的, 当裂纹间距接近这一距离时, 裂纹间距应与得到的饱和间距符合并趋于稳定。

基于以上假设, 本文作者采用了试凑法(cut-and-try), 利用三维有限元法对饱和裂纹间距进行了计算, 并与实验值进行了比较。

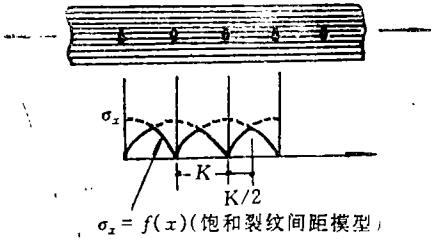


图1 90°层中纵向应力 σ_z 的分布状况

表 1

E_{11}	E_{22}	E_{33}	G_{12}	ν_{12}
127.4 GPa	7.94 GPa	7.94 GPa	4.70 GPa	0.32

$(G_{12}=G_{13}=G_{23}, \nu_{12}=\nu_{13}=\nu_{23})$

二 饱和裂纹间距的计算

1. 计算模型

选用 $[0_2/\pm 45_2/90_2]_s$ 碳/环氧复合材料层板, 它是层板结构的典型铺设形式, 是多向层板结构设计的重要组成。单层材料性能参数如表 1。

假设初始间距长度为 1.2mm。

现从层板中取一块体作为计算模型, 如图 2 所示。90°层中含一条假设的贯穿的横向裂纹, 端部则是新的一条横向裂纹可能出现的位置, 相距为 l (待定的饱和裂纹间距)。

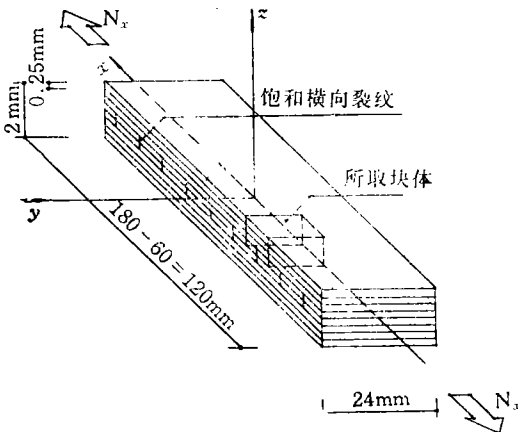


图2 估算饱和裂纹间距的块体取法

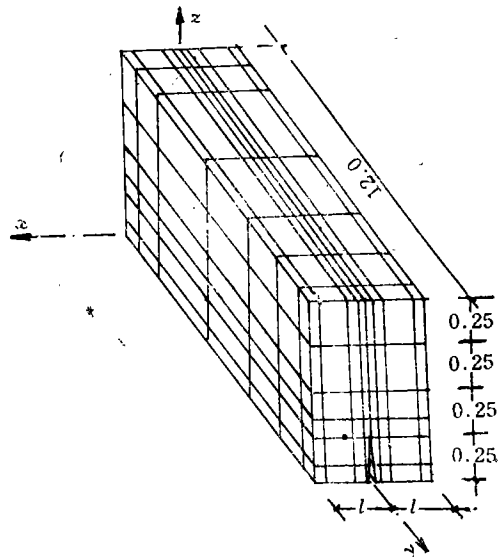


图3 估算饱和裂纹间距的有限元网格

单元网格划分如图 3 所示, 共 384 个单元, 585 个节点(包括裂纹面上)。以下各次试算

中均是如此划分, 只是 l 发生变化.

2. 模型端部外载的施加

根据经典层板理论, 有

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix}$$

其中, N_x, N_y 是层板横截面单位长度 (或宽度) 上的力. $[A]$ 为层板的拉伸刚度, $[B]$ 为耦合刚度, $\{\varepsilon^0\}, \{\kappa\}$ 分别为中面的应变和中面的曲率.

若层板是几何对称和材料性能对称 (都对称于中面), 则耦合刚度 B_{ij} 为零. 在单向拉伸荷载作用下上式可简化为

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix}$$

式中 $A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k t_k$, t_k 为第 k 层层厚.

解得 $\{\varepsilon^0\} = [A]^{-1} \{N\}$

各单层的应力

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix}$$

对于给定的外载 N_x , 由以上几式可定出各单层各自承担的荷载 $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$.

如若在层板端部施加单位宽度力 $N_x = 500 \text{ kg} (1 \text{ kg} = 9.8 \text{ N})$, 则可算得

$$0^\circ \text{层: } \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 650.5089 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{kg/mm}^2)$$

$$+45^\circ \text{层: } \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 156.3571 \\ 106.3293 \end{Bmatrix} \quad (\text{kg/mm}^2)$$

$$-45^\circ \text{层: } \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 156.3571 \\ 106.3293 \end{Bmatrix} \quad (\text{kg/mm}^2)$$

$$90^\circ \text{层: } \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 36.7733 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{kg/mm}^2)$$

3. 饱和裂纹间距的确定

第一次试算: 取 l 为初始间距 1.2 mm

对沿 y 方向上 90° 层中的点 ($z=0$) 进行平均得到 σ_x , 相应 90° 层中的应力分布如图 4.

图中, 曲线起始于裂纹自由表面处的零值, 自距裂纹 0.75 mm 处起, 正应力开始达到稳定值. 为了验证这一值是否是可能的最小值, 还需要试算多次.

第二次试算: 采用同前整理方法, 得出 90° 层中应力分布如图 5 所示.

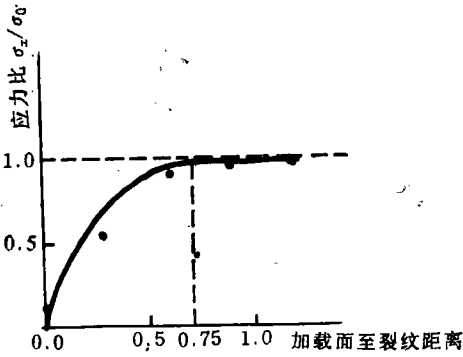


图4 第一次试算90°层中纵向应力 σ_x 的分布

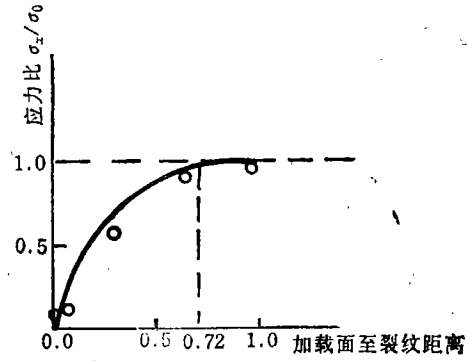


图5 带有裂纹的90°层中纵向应力 σ_x 的分布 (第二次试算)

从图中可以看到，当距裂纹为0.72mm时正应力开始达到稳定值，比第一次试算略有减小。

第三次试算：方法同前，90°层中应力分布如图6所示。

此次计算结果与第二次基本相同。可以看出，从假设的裂纹起到正应力达到稳定值时的位置的最小距离趋于0.72mm。因此，选取此值(0.72mm)作为饱和裂纹间距值。

三、实验分析

试件为 $[c_2/\pm 45_2/90_2]_s$ 碳/环氧复合材料层板，共 $M_{01}, M_{02}, M_{03}, M_{04}$ 四块，分为一组。每一块均重复同样的试验过程。

试件的几何形状如图7所示。 $l=180\text{mm}$ ， $2b=24\text{mm}$ ，层厚 $t=2\text{mm}$ ，单层厚 $t_0=0.125\text{mm}$ ，双层厚(如 $90_2/45_2/0_2$ 等) $h_0=0.25\text{mm}$ 。试件两端分别贴有铝片，以便夹持。材料性能参数同前。

采用二碘甲烷渗透剂增强的X射线探伤技

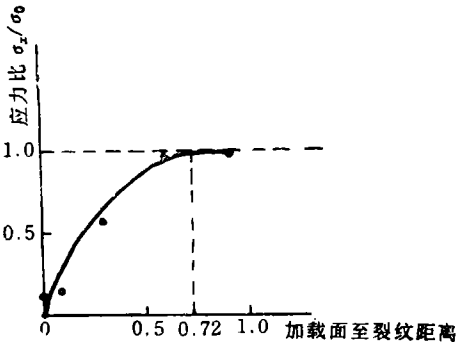


图6 带有裂纹的90°层中纵向应力 σ_x 的分布 (第三次试算)

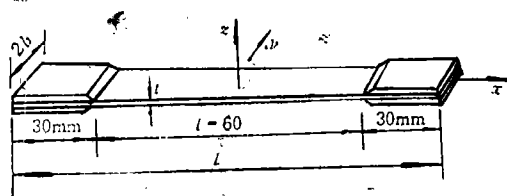


图7 试件几何形状

术检测试件中的损伤状态。实验参数为：管电压60kV，电流4mA，曝光时间4min，在xx-3005型X射线探伤机上拍照。

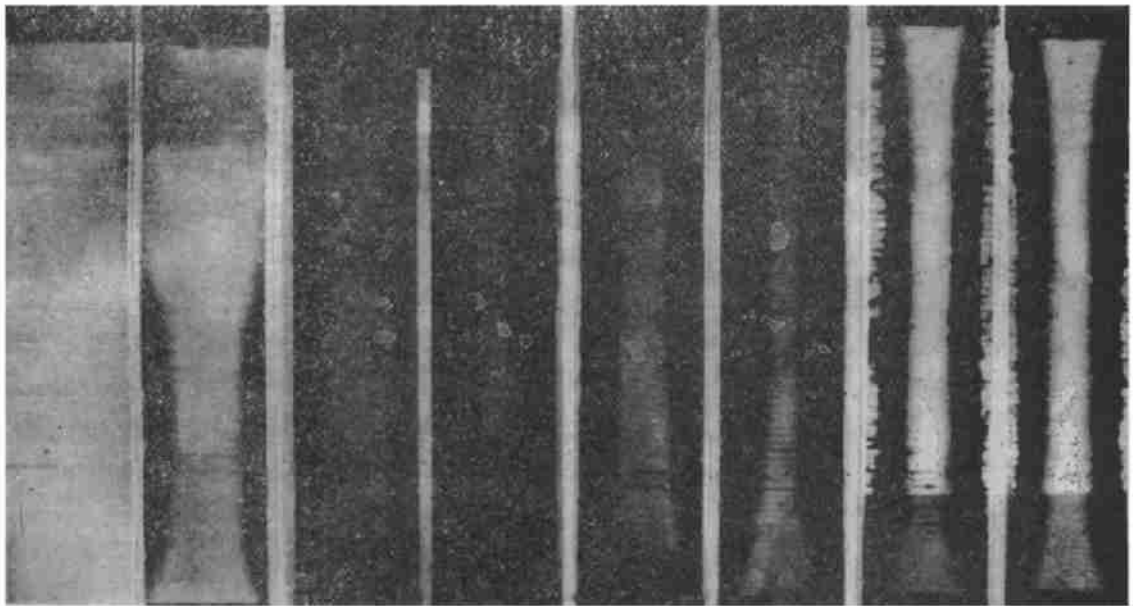
准静态拉伸实验在MTS-880-100KN型试验机上进行，采用荷载控制，加载速度为2kN/min。

试件的损伤以90°层出现横向裂纹开始。随着荷载的增加，横向裂纹的密度逐渐增大，90°层中的基体裂纹一出现马上就贯穿试件的整个宽度。90°层中平行的横向裂纹并不是致密

地排列在一起的,而是存在一定的间距。荷载达到一定程度时(约为破坏荷载的30%),沿着层板纵向、横向裂纹数目不再增加,彼此保持大致相等的距离,达到了饱和状态。同时,自由边缘伴有局部的分层,此时,立即卸载,进行X射线探伤。图8是试件 M_{01} , M_{02} 探伤的结果,照片较清晰地显示出损伤分布。可以看到,基体裂纹先于分层产生并贯穿层板宽度方向,间距大致均匀。从试件两侧边上观察到(受拉时),分层产生于 $-45/90$ 界面上。

分层随着荷载的增加继续沿宽度方向向内部扩展,以分层为最明显特征的损伤区不断扩大。 $-45/0$ 界面上有少量基体裂纹出现,远少于纵向裂纹数目。在此期间对试件进行卸载,进行X射线拍照。图9, 10展示了试件 M_{01} , M_{02} 于第二次、第三次受拉时的损伤状态。图11为试件 M_{01} , M_{02} 第五次受拉时的损伤状态,分层仍为主要损伤形式。

伴随着纤维的崩断声,试件最终断裂。各层断口形状参差不齐,有的以 $\pm 45^\circ$ 剪切断裂出现,有的则以平齐的断裂出现。



(b) 试件 M_{02} (a) 试件 M_{01} (b) 试件 M_{01} (a) 试件 M_{02} (b) 试件 M_{01} (a) 试件 M_{02} (b) 试件 M_{02} (a) 试件 M_{01}

图8 $[0_2/\pm 45_2/90_2]$, 图9 $[0_2/\pm 45_2/90_2]$, 图10 $[0_2/\pm 45_2/90_2]$, 图11 $[0_2/\pm 45_2/90_2]$,
 层板损伤扩展状态 层板损伤扩展状态 层板损伤扩展状态 层板损伤扩展状态
 (第一次拉伸) (第二次拉伸) (第三次拉伸) (第五次拉伸)

根据照片进行测定、统计,横向裂纹的饱和间距值大约在 $0.4\sim 1.3\text{mm}$ 之间波动,小于 1.0mm 的裂纹占大多数。三维有限元法计算的结果与这一实验测定结果相一致。

四、结 论

本文基于 Reifsnider 等人的剪切滞后分析方法的假设,建立了分析模型并采用三维有限元法进行了试算,得出横向裂纹的饱和间距值,其与实验测定值相一致。分析结果表明, 90° 层中横向裂纹的饱和间距是层板固有特性,与外载过程无关。确定横向裂纹间距,并不限于用剪切滞后法预测或实验测定,用试凑法(cut-and-try)也可以试算出来。

参 考 文 献

- [1] Z. Hashin, Analysis of stiffness reduction of cracked cross-ply laminates, *Eng. Fract. Mech.*, **25**(5/6) (1986), 771.
- [2] A. L. Highsmith and K. L. Reifsnider, Stiffness reduction mechanisms in composite laminates, ASTM STP775, *Damage in Composite Materials* (1982).
- [3] A. S. D. Wang, P. C. Chou and S. C. Lei, A stochastic model for the growth of matrix cracks in composite laminates, *J. Composite Materials*, **18** (1984), 239.
- [4] J. W. Lee and I. M. Daniel, Progressive transverse cracking of cross-ply composite laminates, *J. Composite Materials*, **24** (1990), 1225.
- [5] S. G. Lim and C. S. Hong, Prediction of transverse cracking and stiffness reduction in cross-ply laminated composite, *J. Composite Materials*, **23** (1989), 695.

The Cut-and-Try Method in Determining the Saturate Spacing of Transverse Cracks of Composite Laminates

Mao Huiyong

(Anhui Institute of Architecture, Hefei 230022, P. R. China)

Jiang Yongqiu Ye Lin

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China)

Abstract

In this paper, the saturate spacing of transverse cracks of the 90° ply is originally calculated by the 3-D finite element method. Thus, a new approach is put forward for predicting the saturate spacing of transverse cracks.

Key words transverse crack, saturate crack spacing, damage, stress