第3卷第2期　　复 合 材 料 学 报　　Vol. 3 No. 2

1986年6月　　ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA　　June 1986

复合材料层板中基体性能对层间应力分布的影响

叶 林　　杨秉宪

（北京航空学院飞行器設計与应用力学系）

摘　要

本文分析了复合材料层板中基体性能的变化对层间应力的影响，着重討論了层板自由边附近层間界面上的应力分布。分析結果表明，基体性能的变化会对层間应力的分布产生显著的影响。因此，对于实际复合材料結构，有可能通过选用合适的基体来改变复合材料层板自由边附近的层間应力分布，从而減輕复合材料层板的分层破坏。

一、引　言

分层是复合材料层板結构的一个重要的破坏現象。分层的产生和扩展会显著地降低层板的承载能力、刚度和寿命。因此对于复合材料的应用来说，一个很重要的问题就是怎样控制分层的产生和扩展。层间应力是层板局部分层起始和扩展的主要原因。在过去的十几年里，已着重讨论了怎样计算层間应力的问题。从实验结果[1]和理论分析结果[2]看，选择合适的鋪层順序是減轻和消除分层破坏的一个重要途径。

复合材料通常是由纤维和树酯基体所组成。可以设想，基体性能的变化会影响复合材料层板的力学响应。因此如果根据实际結构选择合适的基体，就可以改变复合材料层板自由边附近的层间应力分布，从而使层间应力引起的分层破坏得以減轻甚至消除。本文在此探讨了具有不同力学性能的基体对层间应力分布的影响。

二、計算模型

确定一般复合材料层板結构中的应力状态通常需要三维有限元法。但如果考虑一个受均

本文1985年7月收到，1986年2月收到修改稿

值应变拉伸、有限宽度的柱型对称层板，并且承受的载荷不沿 z 轴变化。根据圣韦南原理，在远离端点的区域，层板中的应力应变分布将与z轴无关。这就是 $Pipes—Pagano$[3] 问题（图 1）。设$\varepsilon_z=\varepsilon_0$，则层板中的位移場就可以表示为：

$$\mathbf{u}=\mathbf{u}_0+\mathbf{U} \tag{1}$$

$$\mathbf{u}^T=\{u,\ v,\ w\} \tag{2.a}$$

$$\mathbf{u}_0^T=\{0,\ 0,\ \varepsilon_0 z\} \tag{2.b}$$

$$\mathbf{U}^T=\{U(x,\ y),\ V(x,\ y),\ W(x,\ y)\} \tag{2.c}$$

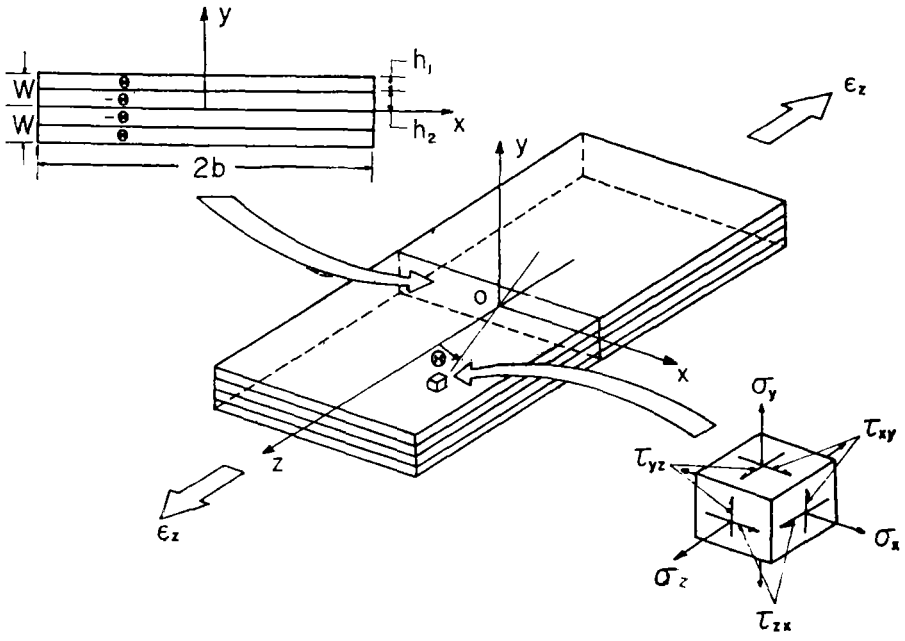

图 1　层板的几何形状与坐标系

为了分析基体性能对复合材料层板中层间应力分布的影响，本文建立了准三维有限元分析过程，它类似于文献[2]中的有限元分析方法，与之不同的只是采用了计算精度较高的八节点等参元。

三、材料弹性常数与远場載荷的确定

典型的碳纤维通常可以认为是横观各向同性的。根据文献[4]，本文选取的$T300$型纤维基本参数为：

$$E_f=193.1GPa \qquad E_{fy}=14.GPa \qquad G_f=14.5GPa$$

$$\nu_f=0.3 \qquad \nu_{fy}=0.4 \tag{3}$$

其中 y 代表垂直于纤维轴的各向同性平面。

本文以648#树脂基体为基准，假设了另外两种基体。

$$\begin{aligned}&(1)\ E_m^1=E_m^0=3.14GPa\\&(2)\ E_m^2=2E_m^0=6.28GPa\\&(3)\ E_m^3=0.5E_m^0=1.7GPa\end{aligned} \tag{4}$$

取$\nu_m^i=\nu_m^0=0.35$

采用$Tsai-\eta$系数方法[5]来估算单层板的弹性常数。选取纤维体积率$V_f=0.65$，并采用常用的简化方法，取：

$$G_{12}=G_{31}=G_{32},\quad \nu_{12}=\nu_{31}=\nu_{32} \tag{5}$$

计算出的弹性常数列于表 1。

基体的性能变化以后，会引起单层弹性常数的变化。从表 1 中可以看到，除纤维方向的模量E_{33}和泊松系数以外，其它量有非常显著的变化。因此整个层板的刚度就会发生变化。当讨论一个结构的特性时，一般多以结构的承载能力来进行评价。为了比较含不同基体的层板在承受相同载荷下的应力分布，本文通过以下方法使含不同基体的层板在远場承受相同的载荷。

在这里，假定层板的结构刚度可以用层板理论来计算，以第一种基体的层板为基准，则另外两种基体的层板在远場所承受的应变为：

$$\varepsilon_0^i=\frac{C_{zz}^i}{C_{zz}^1}\qquad (i=2,3) \tag{6}$$

其中C_{zz}是依据层板理论计算出来的对应于层板纵向的主柔度系数。在计算中，取$\varepsilon_0^1=0.001$。

四、計算結果分析

本文分析了$[45/-45]_s$和$[0/90]_s$复合材料两种层板。层板横剖面的几何形状如图 1 所示。几何参数取如下形式：$b=20.32cm$，$h_1=h_2=h=2.54cm$。

由层板的几何参数和材料的对称性，计算时只需要取其横剖面的1/4部分。单元网格划分如图 2 所示。

图 3 绘出了具有不同基体的$[45/-45]_s$层板中应力σ_z沿界面($y=h^+$)的分布。σ_z在靠近自由边处有明显的应力集中现象。从图中可以看到，对于含不同基体的层板，在远离自由边处，σ_z趋于同一值，这也说明了近似假设(6)式是可行的。

图 2　单元网格划分

表1　单层材料性能

	模　量 (GPa)			泊松系数
	E_{33}	$E_{11}=E_{22}$	$G_{12}=G_{31}=G_{32}$	$\nu_{12}=\nu_{31}=\nu_{32}$
基体 1	126.6	8.59	4.22	0.32
基体 2	127.7	12.48	6.87	0.32
基体 3	126.1	5.29	2.38	0.32

有一点非常明显，基体的模量越高，σ_z 在自由边附近应力峰值的大小和应力集中的程度越低。而且随着基体模量的增加，具有平缓应力的区域也扩大。

图 4 和图 5 分别是[45/－45]$_s$层板中应力分量σ_y、τ_{yz}沿界面（$y=h^+$）的分布。σ_y即为通常所称的层间正应力。对于[45/－45]$_s$层板，在拉伸载荷下，在靠近自由边附近，σ_y呈压应力。随着基体模量的增加，σ_y增大（绝对值减小）。如是压缩载荷，σ_y将是张开应力，并且随着基体模量的增加，应力的奇异性程度会降低。对于应力τ_{yz}，它与应力分量σ_z有相同的特点。应力在自由边附近分布的奇异性和峰值的大小随基体模量的增高而降低，但降低的程度不明显。

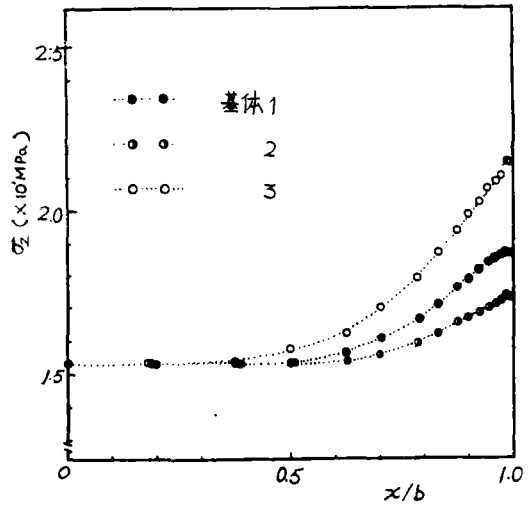

图 3　[45/－45]$_s$层板中应力分量 σ_z 沿层間界面（$y=h^+$）的分布

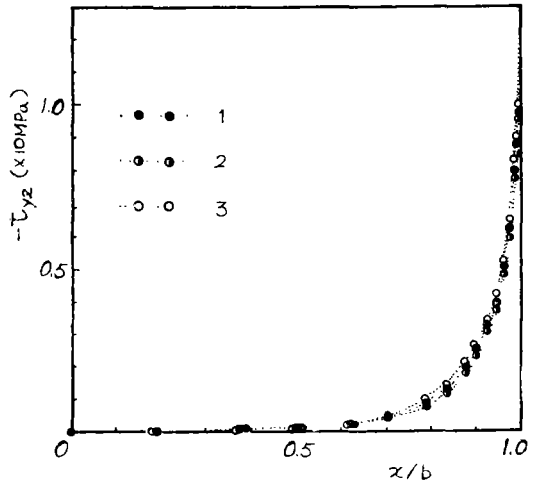

图 4　[45/－45]$_s$层板中应力分量τ_{yz}沿层間界面（$y=h$）的分布

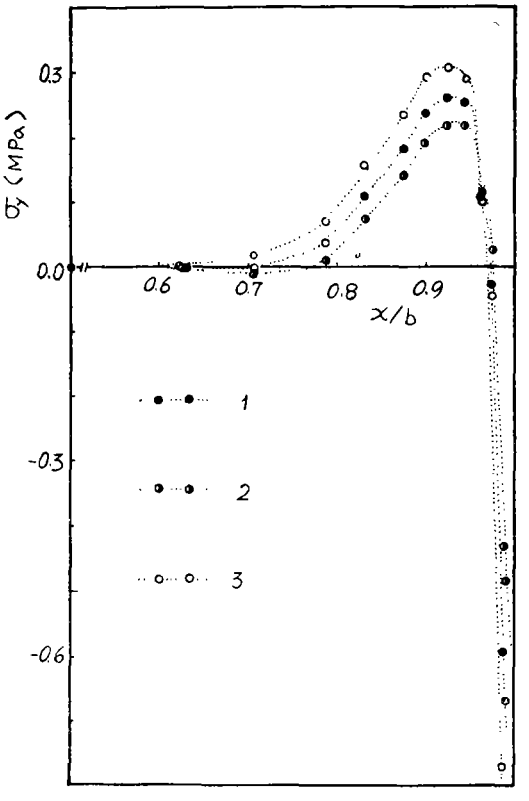

图 5　[45/－45]$_s$层板中应力分量σ_y沿层間界面（$y=h$）的分布

图 6 和图 7 是[0/90]$_s$层板中层间正应力σ_y沿界面（$y=h$，$y=0$）的分布，对于[0/90]$_s$层板，σ_y在自由边附近呈张开应力，并且有较强烈的奇异程度。从图中可以看到，在自由边附近，随着基体模量的增加，σ_y的峰值和奇异性程度明显增大，并且压应力和拉应力区

的转换点变动不明显。图 8 是在自由边附近σ_y沿厚度方向的分布。σ_y的最大值发生在90°层中。从图中可以看到，基体性能的变化对σ_y的分布及峰值大小的影响程度是很大的。

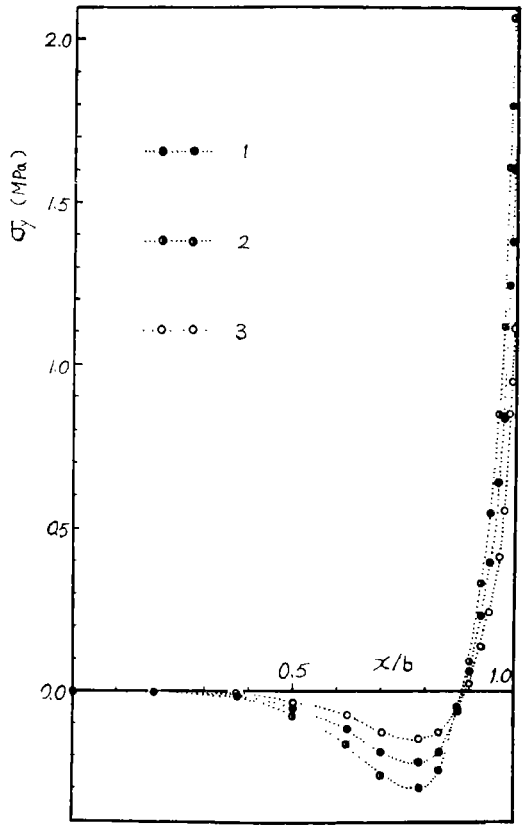

图 6　[0/90]$_s$层板中应力分量σ_y沿层間界面（$y=h$）的分布

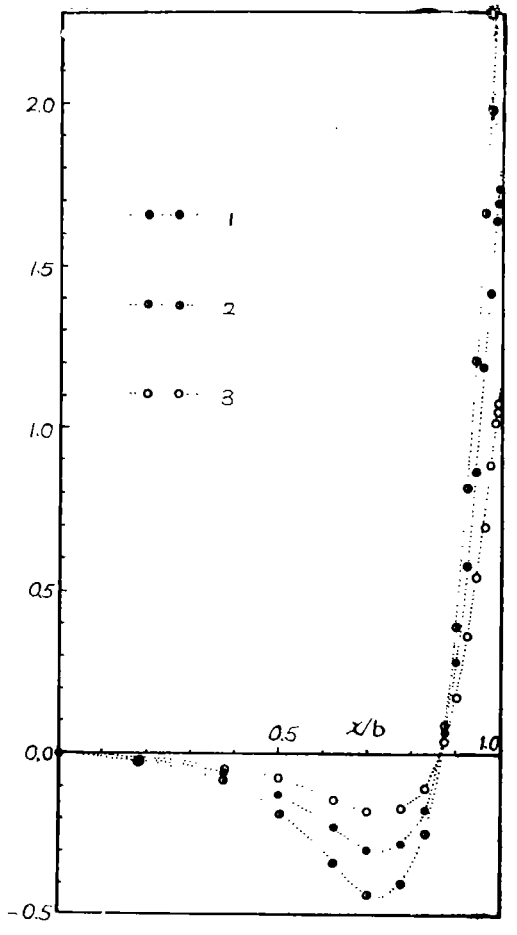

图 7　[0/90]$_s$层板中应力分量σ_y沿层間界面（$y=h$）的分布

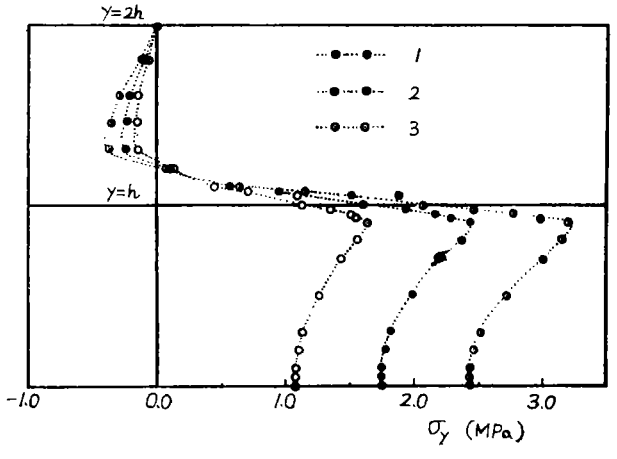

图 8　[0/90]$_s$层板中σ_y在自由边附近（$x/b=0.994$）沿厚度的分布

四、結　論

本文采用准三维有限元方法分析了复合材料层板中基体性能的变化对〔45/－45〕$_s$和〔0/90〕$_s$两种复合材料层板中层间应力分布的影响。分析结果表明，基体性能的变化会对层间应力的峰值和奇异性程度产生显著的影响。文献〔6〕指出导致层间分层破坏的主要原因是层间张开应力的存在。因此，对于实际结构，有可能选用合适的基体来减轻层板的分层破坏。

应该强调的一点是，对于复合材料结构而言，结构和材料往往是一次生产出来的。它与一般金属材料的先加工原料，然后加工成结构的生产过程是不同的。因此人们可以充分地利用复合材料结构的可设计性，选择合适的基体和铺层形式，使得一些可能的破坏现象得以减轻和消除。

参 考 文 献

〔1〕 N.J.Pagano and R.B.Pipes, Int.J.Mech.Sci., Vol.15, pp.679—688, 1973.

〔2〕 A.S.D.Wang and F.W.Crossman, J.Composite Materials, Vol.11, pp.92—106, 1977.

〔3〕 R.B.Pipes and N.J.Pagano, J.Composite Materials, Vol.4, pp.538—548, 1970.

〔4〕 刘桂荣，T300/环氧复合材料高温力学行为的实验研究和理论分析，硕士学位論文，北京航空学院，pp.135—136，1984.

〔5〕 S.W.Tsai and H.T.Hahn, Introduction to Composite Materials, Westport, Connecticut, Technomic, pp.379—402, 1980.

〔6〕 J.M.Whitney, I.M.Daniel and R.B.Pipes, "Experimental Mechanics of Fiber Reinforced Compoite Materials", Brookfield Center, Connecticut, The Society for Experimental Stress Analysis, pp.56—70, 1982.

会议消息

第四届国际复合材料结构会议

继前三届会議后，第四届国际复合材料結构会議 *ICCS*—Ⅳ将于 1987 年 7 月27—29日在苏格蘭佩斯利工学院召开，仍由佩斯利工学院主办。有关复合材料在工程結构和結构元件上应用的实际問題研究和理論分析工作都可作为征文内容，前者尤其受欢迎。要求論文有所創新，并未在刊物上发表过。应征者請于1986年 8 月 1 日前提交800字（*words*）左右的英文摘要，1986年10月接到录取通知后的将論文于1987年 1 月31日前寄到筹委会。会議語言为英文。通信地址：

Dr. I. H. Marshall, Conference Director
Paisley College of Technology
High Street, Paisley Renfrewshire
Scotland PA1 2BE, U.K.

（呼延）

MINIMUM WEIGHT DESIGN OF COMPOSITE STRUCTURE USING SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING METHOD

Zhu Jiansen and Qiao Xin

Department of Flight Vehicle
Nanjing Aeronautical Institute, Nanjing, China

(Received September 1985)

ABSTRACT

Optimality Criteria Method (OCM) has been successfully used in the optimum design of fiber reinforced composite structures with stress and displacement constraints. The default of OCM for this kind problem is that its efficiency is not very high and the iteration history is rather long. In this paper, reciprocal variables have been used and the original problem has been replaced by a dual problem in quadratic form and by SQPM, and then the dual problem of mathematical programming has resulted in a very efficient method of composite structural optimization. The results of comparison of the two methods in one example are presented. The project is supported by the Science Fund of the Chinese Academy of Science.

EFFECT OF MATRIX PROPFRTIES ON THE DISTRIBUTIONS OF INTERLAMINAR STRESSES IN COMPOSITE LAMINATES

Ye Lin and Yang Bingxian

Department of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics
Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China

(Received July 1985)

ABSTRACT

The stress response in composite laminates can be effected by changing the properties of fibers and matrices. According to this assumption, a study on the effect of matrix properties on the distributions of interlaminar stresse is presented. Tsai's method is used to predict the lamina properties from fiber and matrix properties. Three kinds of matrices are chosen

for the investigation and their moduli are significantly different from one another. The Pipes–Pagano problem which consists of a symmetric composite laminate under uniform axial strain is studied with quasi-three-dimensional finite element procedure. In order to discuss the stress responses of the composite laminates made of different matrixes under the same loading, a simple formula is developed to keep the laminates to be subjected to the same axial loading at the ends.

The results for an angle-ply $(\pm 45)_s$ and a symmetric cross-ply $(0/90)_s$ laminates are presented. Emphasis is placed on assessing the srress behavior in the regions close to ply-interface and exposed free edge. The solutions indicate that the change of matrix properties may have significant effect on the singular behavior and distributions of interlaminar stresses in the laminates. In the design of laminated composite structures, therefore, if the stacking sequence can not be changed, it is possiple to choose a proper kind of matrix to suppress delamination of composite laminates.

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE TENSOR MULTINOMIAL CRITERION OF COMPOSITE

Wang Xingye

The Fifth Department, National University of Defence Technology

Changsha, Hunan, China

(Received October 1985)

ABSTRACT

A criterion of tensor multinomial of strength is theoretically analysed and the strength envelopes of laminates with different F_{12} are given. The effect of F_{12} on the envelopes is shown and a method to determine interaction coefficient F_{12} is proposed. The criterion is verified with two experiments. The results show that Tsai-Wu criterion of tensor multinomial is in excellent agreement with theoretical values in the tension-shear space. And the values from the experiments are in agreement with the theoretical values from the determination of this paper in quadrant 1 and 4.