第2卷 第2期 复 合 材 料 学 报 Vol. 2 No. 2

1985年6月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA June 1985

复合材料叠层板在侧向载荷与平面载荷联合作用下的非线性弯曲

航空工业部第三二〇厂 張 跃

摘 要

本文研究了具有任意叠层形式的复合材料矩形平板在均匀侧压与平面载荷联合作用下的非线性弯曲特性。板的基本方程归結为一对互相偶合的四阶偏微分方程，将基本变量——板的挠度函数和力函数分别表示成梁的某种振形函数的級数后，基本方程轉化为非線性代数方程組。本文的研究重点是作用剪力方向与板件弯曲特性的关系，并对一系列具有不同参数的板件进行了数值計算。結果表明，作用剪力方向对叠层板的弯曲性状可产生明顯的影响。

一、引 言

复合材料叠层板在各种载荷作用下的线性与非线性力学特征性已由许多学者[1～4]进行过理论分析与试验研究。*Ashton*等人[1]发现，作用剪力方向对于某些叠层平板在剪切载荷作用下的初始屈曲载荷有很大影响，剪力方向不同，板的剪切临界载荷可有很大差别。本文作者与*Matthews*[5,6]在研究承受面內复合载荷的叠层平板和曲板的屈曲时发现，对应于不同的剪力方向，受轴压与剪切联合作用的板件有两类不同的临界载荷复合关系。作者与*Matthews*[7]也对叠层板在纯剪切载荷或轴压与剪切复合载荷作用下的超临界性状进行了研究。结果表明，对于不同的剪力方向，复合材料叠层板可有两条完全不同的超临界路径。

本文是作者对前述工作的继续与发展，文中给出了一种理论分析方法以研究具有任意叠层形式的固支矩形板在侧向载荷和平面载荷联合作用下的非线性特性，同时对一系列具有各种参数的板件进行了数值计算。结果表明，作用剪力的方向对于受侧向载荷与平面载荷联合作用的板件也是十分重要的，对应于两种不同剪力方向、叠层板的变形性状可有很大差别。

本文1984年6月收到

二、基本方程

设复合材料矩形平板的板长为 a，板宽为 b，板厚为 h。该板由若干层纤维增强复合材料叠制而成。板件为线弹性薄板并受有均匀轴压、剪切和侧压载荷的联合作用（见图 1）。

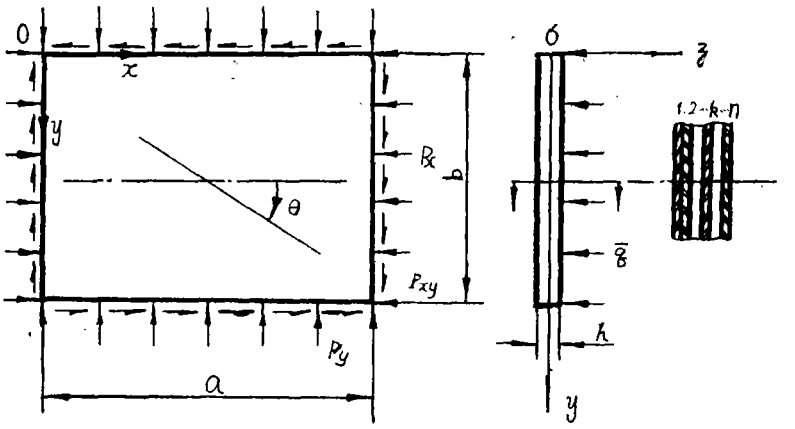

图 1　叠层板的几何尺寸与载荷

板的平衡方程由能量极值原理导出[8]：

$$\int_0^a \int_0^b \left(\frac{\partial N_x}{\partial x}+\frac{\partial N_{xy}}{\partial y}\right)\delta u_0 dxdy=0 \tag{1}$$

$$\int_0^a \int_0^b \left(\frac{\partial N_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial N_y}{\partial y}\right)\delta v_0 dxdy=0 \tag{2}$$

$$\int_0^a \int_0^b \left\{\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2}+2\frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x\partial y}+N_x\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}+N_y\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}+2N_{xy}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x\partial y}\right.$$
$$\left.+\frac{\partial w_0}{\partial x}\left(\frac{\partial N_x}{\partial x}+\frac{\partial N_{xy}}{\partial y}\right)+\frac{\partial w_0}{\partial y}\left(\frac{\partial N_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial N_y}{\partial y}\right)+\bar{q}\right\}\delta w_0 dxdy=0 \tag{3}$$

其中 N_x，N_y，N_{xy} 为板单位宽度的薄膜力；M_x，M_y，M_{xy} 为板单位宽度的内力矩；u_0，v_0，w_0 为板中面在 x，y，z 方向上的位移；$\bar{q}$ 为板单位面积上的侧向载荷。

引入力函数 ϕ 使得：

$$N_x=\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2},\qquad N_y=\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2},\qquad N_{xy}=-\frac{\partial^2\phi}{\partial x\partial y} \tag{4}$$

则方程（1）与（2）将自动满足，而方程（3）将变成：

$$\int_0^a \int_0^b \left\{\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2}+2\frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2\phi}{\partial y^2}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}\right.$$
$$\left.-2\frac{\partial^2\phi}{\partial x\partial y}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x\partial y}+\bar{q}\right\}\delta w_0 dxdy=0 \tag{5}$$

板的中面应变表达式如下：

$$\varepsilon_x^0=\frac{\partial u_0}{\partial x}+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w_0}{\partial x}\right)^2;\quad \varepsilon_y^0=\frac{\partial v_0}{\partial y}+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w_0}{\partial y}\right)^2;$$

$$\gamma_{xy}^0=\frac{\partial u_0}{\partial y}+\frac{\partial v_0}{\partial x}+\frac{\partial w_0}{\partial x}\frac{\partial w_0}{\partial y} \tag{6}$$

式中ε_x^0，ε_y^0，γ_{xy}^0为板中面沿x，y方向的正应变和板中面的剪应变。

板的应变协调方程则可写成下列形式[10]：

$$\int_0^a\int_0^b\left\{\frac{\partial^2\varepsilon_x^0}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\varepsilon_y^0}{\partial x^2}-\frac{\partial^2\gamma_{xy}^0}{\partial x\partial y}-\left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x\partial y}\right)^2+\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}\right\}\delta\phi dxdy=0 \tag{7}$$

对于具有任意叠层形式的复合材料薄板可有如下本构方程：

$$\begin{vmatrix}\varepsilon_x^0\\ \varepsilon_y^0\\ \gamma_{xy}^0\\ M_x\\ M_y\\ M_{xy}\end{vmatrix}=\begin{vmatrix}A_{11}^* & A_{12}^* & A_{16}^* & B_{11}^* & B_{12}^* & B_{16}^*\\ A_{21}^* & A_{22}^* & A_{26}^* & B_{21}^* & B_{22}^* & B_{26}^*\\ A_{61}^* & A_{62}^* & A_{66}^* & B_{61}^* & B_{62}^* & B_{66}^*\\ -B_{11}^* & -B_{21}^* & -B_{61}^* & D_{11}^* & D_{12}^* & D_{16}^*\\ -B_{12}^* & -B_{22}^* & -B_{62}^* & D_{21}^* & D_{22}^* & D_{26}^*\\ -B_{16}^* & -B_{26}^* & -B_{66}^* & D_{61}^* & D_{62}^* & D_{66}^*\end{vmatrix}\begin{vmatrix}\frac{\partial^2\phi}{\partial y^2}\\ \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}\\ -\frac{\partial^2\phi}{\partial x\partial y}\\ -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}\\ -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}\\ -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x\partial y}\end{vmatrix} \tag{8}$$

式中系数矩阵的元素A_{ij}^*，B_{ij}^*，D_{ij}^*（i，$j=1$，2，6，）与板的材料性质及各层的纤维取向角有关，其表达式见有关著作[9]。本文研究所有矩阵元素均不为零的一般情况。

将本构方程（8）代入方程（5）与（7），并将结果无量纲化，可得如下方程组：

$$\int_0^1\int_0^1\left\{\frac{\partial^4 F}{\partial\xi^4}+a_1\frac{\partial^4 F}{\partial\xi^3\partial\eta}+a_2\frac{\partial^4 F}{\partial\xi^2\partial\eta^2}+a_3\frac{\partial^4 F}{\partial\xi\partial\eta^3}+a_4\frac{\partial^4 F}{\partial\eta^4}+a_5\frac{\partial^4 w}{\partial\xi^4}+a_6\frac{\partial^4 w}{\partial\xi^3\partial\eta}\right.$$
$$\left.+a_7\frac{\partial^4 w}{\partial\xi^2\partial\eta^2}+a_8\frac{\partial^4 w}{\partial\xi\partial\eta^3}+a_9\frac{\partial^4 w}{\partial\eta^4}+a_{10}\left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial\xi\partial\eta}\right)^2-\frac{\partial^2 w}{\partial\xi^2}\frac{\partial^2 w}{\partial\eta^2}\right]\right\}\delta F d\xi d\eta=0 \tag{9}$$

$$\int_0^1\int_0^1\left\{\frac{\partial^4 w}{\partial\xi^4}+b_1\frac{\partial^4 w}{\partial\xi^3\partial\eta}+b_2\frac{\partial^4 w}{\partial\xi^2\partial\eta^2}+b_3\frac{\partial^4 w}{\partial\xi\partial\eta^3}+b_4\frac{\partial^4 w}{\partial\eta^4}+b_5\frac{\partial^4 F}{\partial\xi^4}\right.$$
$$+b_6\frac{\partial^4 F}{\partial\xi^3\partial\eta}+b_7\frac{\partial^4 F}{\partial\xi^2\partial\eta^2}+b_8\frac{\partial^4 F}{\partial\xi\partial\eta^3}+b_9\frac{\partial^4 F}{\partial\eta^4}+b_{10}\left[\frac{\partial^2 w}{\partial\xi^2}\frac{\partial^2 F}{\partial\eta^2}\right.$$
$$\left.\left.+\frac{\partial^2 w}{\partial\eta^2}\frac{\partial^2 F}{\partial\xi^2}-2\frac{\partial^2 w}{\partial\xi\partial\eta}\frac{\partial^2 F}{\partial\xi\partial\eta}\right]\right\}\delta w d\xi d\eta=\int_0^1\int_0^1 b_{11}\bar{Q}\,\delta w d\xi d\eta \tag{10}$$

其中
$$\begin{cases}\xi=x/a, & \eta=y/b, & w=w_0/h,\\ F=\phi/E_T h^3, & \bar{q}=qb^4/E_T h^4\end{cases} \tag{11}$$

这里，E_T为板件材料垂直于纤维方向的杨氏模量，系数a_i和b_i（$i=1, 2, \cdots, 11$）与板的材料特性及几何特性有关，为节省篇幅，具体表达式請参见文献[8]。

方程（9）与（10）为一对互相偶合的四阶偏微分方程，须联立求解。方程的基本未知量为无量纲挠度函数w和力函数F。

三、边界条件与問題的解

对于一类四边固支的矩形叠层板，可有如下边界条件：
$$\begin{cases}w=0,\ \partial w/\partial\xi=0,\ \partial^2F/\partial\eta^2=-\bar{N}_x,\ \partial^2F/\partial\xi\partial\eta=-\beta\bar{S} & \text{当}\xi=0,\ 1\\ w=0,\ \partial w/\partial\eta=0,\ \partial^2F/\partial\xi^2=-\beta^2\bar{N}_y,\ \partial^2F/\partial\xi\partial\eta=-\beta\bar{S} & \text{当}\eta=0,\ 1\end{cases} \tag{12}$$
其中，
$$\bar{N}_x=P_xb^2/E_Th^3,\quad \bar{N}_y=P_yb^2/E_Th^3,\quad \bar{S}=P_{xy}b^2/E_Th^3 \tag{13}$$
式中P_x，P_y和P_{xy}分别为作用在板边上x，y方向的均匀轴压和匀均剪切载荷。

方程（9）和（10）的解可以取作如下级数形式：
$$\begin{cases}F=-\bar{N}_x\eta^2/2-\bar{N}_y\beta^2\xi^2/2-\bar{S}\beta\xi\eta+\sum\limits_{m=1}^{\infty}\sum\limits_{n=1}^{\infty}F_{mn}X_m(\xi)Y_n(\eta)\\ w=\sum\limits_{p=1}^{\infty}\sum\limits_{q=1}^{\infty}w_{pq}X_p(\xi)Y_q(\eta)\end{cases} \tag{14}$$
其中$X_i(\xi)$和$Y_i(\eta)$为某类梁振形函数，定义为：
$$\begin{cases}X_i(\xi)=ch\alpha_i\xi-cos\alpha_i\xi-\gamma_i(sh\alpha_i\xi-sin\alpha_i\xi)\\ Y_i(\eta)=ch\alpha_i\eta-cos\alpha_i\eta-\gamma_i(sh\alpha_i\eta-sin\alpha_i\eta)\end{cases} \tag{15}$$
式中α_i和r_i为常数可由下列方程求出：
$$\begin{cases}ch\alpha_i-cos\alpha_i-\gamma_i(sh\alpha_i-sin\alpha_i)=0\\ sh\alpha_i+sin\alpha_i-\gamma_i(ch\alpha_i-cos\alpha_i)=0\end{cases} \tag{16}$$
这些常数的计算结果见附表1。

将（14）式代入基本方程（9）与（10），可得无穷多个非线性代数方程，其基本变量为（14）式中的待定系数F_{mn}和w_{pq}。不难发现，（14）式满足边界条件（12）。为求数值解，可将（14）式适当截断，即令（14）式中级数脚标m，n，p，$q=1, 2, \cdots, M_0$；其中M_0为某一指定的正整数。这样，方程可化作矩阵形式：
$$[A^{(1)}]\{F\}=[A^{(2)}]\{w\}+[T_w][A^{(3)}]\{w\} \tag{17}$$
$$[B^{(1)}]\{w\}+[B^{(2)}]\{F\}+[T_w][B^{(3)}]\{F\}-K[C^{(2)}]\{w\}-\bar{Q}\{C^{(3)}\}=0 \tag{18}$$
上述式中，列阵$\{F\}$和$\{w\}$的元素是系数F_{mn}和w_{pq}；矩阵$[A^{(i)}]$,$[B^{(i)}]$和$[C^{(i)}]$为系数矩阵，这些矩阵的元素详见文献[8]。而矩阵$[T_w]$和系数K的定义如下：

$$[T_w]=\begin{pmatrix}\{w\}^T & & & \\ & \{w\}^T & & \\ & & \ddots & \\ & & & \{w\}^T\end{pmatrix} \tag{19}$$

$$K=Pb^2/E_Th^3 \tag{20}$$

令
$$\mu_xP=P_x,\quad \mu_yP=P_y,\quad \mu_sP=P_{xy} \tag{21}$$

载荷比参数μ_x，μ_y与μ_s可根据载荷状况确定，如板受纯轴压时$\mu_x=1.0$，$\mu_y=\mu_s=0$。板受纯剪切时$\mu_x=\mu_y=0$，$\mu_s=1.0$。复合受载情况可根据需要组合而得。

由方程（17）解出列阵$\{F\}$并代入（18）式，可得：

$$[C^{(1)}]\{w\}=K[C^{(2)}]\{w\}+\bar{Q}\{C^{(3)}\} \tag{22}$$

其中，

$$\begin{cases}[C^{(1)}]=[B^{(1)}]+[[B^{(2)}]+[T_w][B^{(3)}]][A^{(1)}]^{-1}[D^{(1)}]\\ [D^{(1)}]=[A^{(2)}]+[T_W][A^{(3)}]\end{cases} \tag{23}$$

方程（22）又可进一步写作：

$$[C^{(1)}]\{W\}-K[[C^{(2)}]\{w\}+C_K\{C^{(3)}\}]=0 \tag{24}$$

方程（24）的基本变量为$\{W\}$和载荷参数K。式中C_K表示侧向载荷与面内载荷之比值，即

$$C_K=\frac{\bar{Q}}{K}=\frac{\bar{q}b^2}{Ph} \tag{25}$$

四、数值計算

对方程（24）的求解采用叠代法，叠代初值这样选取：令列阵$\{w\}$的第一个分量等于指定的步长，其余分量以及参数K均取为零。选用的叠代法为改进的牛顿法。通过叠代求得方程的一组解，即可确定板变形路径上的一点。新点上的解$\{w\}$和K值成为求下一点的初值，只是让$\{w\}$的第一分量再增加一个步长。如此求取路径上的三点后就可应用外插法确定下一点的初值。叠代收敛的标准为（24）式中各代数方程余数的平方和不大于0.0001。叠代过程的步长对不同的板件或变形路径的不同部分取得也不同，本文算例取的步长变化范围为0.001～0.5。

当侧向载荷为零时，先须求取板件初始层曲的特征解，进而求解板的超临界特性，这种情况已在文献[7]中讨论。

复合材料叠层板的参数很多，为使结果相对集中和便于比较，对某些参数作适当限定。本文算例中取$h/b=0.01$，所用材料性能见附表2。

计算中力函数F和挠度函数w各取其前四项，计算在$CDC6500$电子计算机上完成，结果整理在图2～图8中，图中所示均为板中心挠度与载荷的关系。

图2为不同C_K下（±45℃）$_s$叠层的碳/环氧方板在剪切与侧压联合作用下板的变形计算结果，由图可知，板的变形随C_K值变化而不同。

图 3，图 4 与图 5 为各种不同±45°叠层形式的碳/环氧方板在剪切与侧压联合作用下的变形，计算中考虑了不同的剪力方向并取 $C_K=1$。图 3 为沿厚度方向叠层形式为对称的板件，图 4 为具有反对简叠层形式的板件、图 5 为非对称叠层的板件。图 3 说明，剪力方向对对称叠层板的弯曲性状具有明显影响，也就是说，这些板件在两种不同方向剪力作中下表现出不同的侧向刚度、而板中层数越少，这一现象越明显。

图 4 表明，剪力方向的变更对反对称板的弯曲性状并无影响，这也自然，因为对这种板件，剪力方向变更仅相当于将原板件翻转180°。

由图 5 可知，剪力方向的变更对于非对称叠层板的弯曲性状也可产生明显影响，只是叠层不同影响也不同。一般而言，板两面的外层纤维具有相同方向时影响明显。

图 6 为 $(\pm 45°)_s$ 的碳/环氧方板在轴压、剪切与侧压复合作用下的变形。这里计算了两种不同的轴压情况，即单向轴压（取 $\mu_x=C_K=1.0$，$\mu_s=\pm 1.0$，$\mu_y=0$）和双向轴压（取 $\mu_x=\mu_y=C_K=1.0$，$\mu_s=\pm 1.0$）。在图上分别注明为 $P_x+P_{xy}+Q$ 和 $P_x+P_y+P_{xy}+Q$。由图可知剪力方向的影响也十分明显。

图 7 计算了具有不同边长比的 $(\pm 45°)_s$ 的碳/环氧方板为剪切与侧压联合作用下的弯曲变形，这些板件对剪力方向也很敏感。

图 8 计算了不同材料的 $(\pm 45°)_s$ 叠层方板，载荷状况与图 6 一样，由结果可知，材料特性不同（特别是 E_L/E_T 值不同），剪力方向变更引起的影响也不同，一般而言，材料各向异性程度强烈，剪力方向的影响也大。

上述算例说明了剪力方向对承受包括侧压在内的复合载荷的叠层变形性状的作用及影响因素。但在真实结构中，板件承受的剪切载荷方向往往是确定不变。，在这种情况下，要提高板的抗弯刚度，就应正确选择板中各叠层的纤维方向。因为作用在板上的剪切载荷在板的一个对角线方向产生拉伸的作用，而在另一个对角线方向产生压缩的作用，而叠层板在不同方向上的抗弯性能可有明显差异，如果剪切载荷产生的合拉力与板件具有较弱抗弯性能的方向一致，那么板件在抵抗侧向载荷或压缩载荷时就会表现出较高的刚度。因为外层纤维对板的弯曲刚度影响最大，所以使外层纤维的方向沿着或尽量接近于剪力产生的合压力方向布置，这对提高板的刚度是有利的。

結　論

通过以上数值计算，可以得出如下结论：

1. 作用剪力方向对于承受剪切与侧压联合或剪切、轴压与侧压联合作用的复合材料叠层板的弯曲特性可有较大影响。对应于不同的剪力方向，板件可以存在两条不同的弯曲变形路径。

2. 剪力方向对板变形影响的大小与板中的叠层形式有关，当板中的叠层沿板中面对称或一般非对称时都可对弯曲变形产生影响，但当板中具有反对称叠层时，剪力方向没有影响。

3. 剪力方向的影响随板中交错层数的增加而减弱，当板中交错叠层数目很大时，板在平面载荷与侧向载荷联合作用下弯曲特征不再受剪力方向变更的影响。

4. 剪力方向影响的大小与板件材料的各向异性程度有关。一般而言，E_L/E_T 值越大，剪力方向的影响也大。

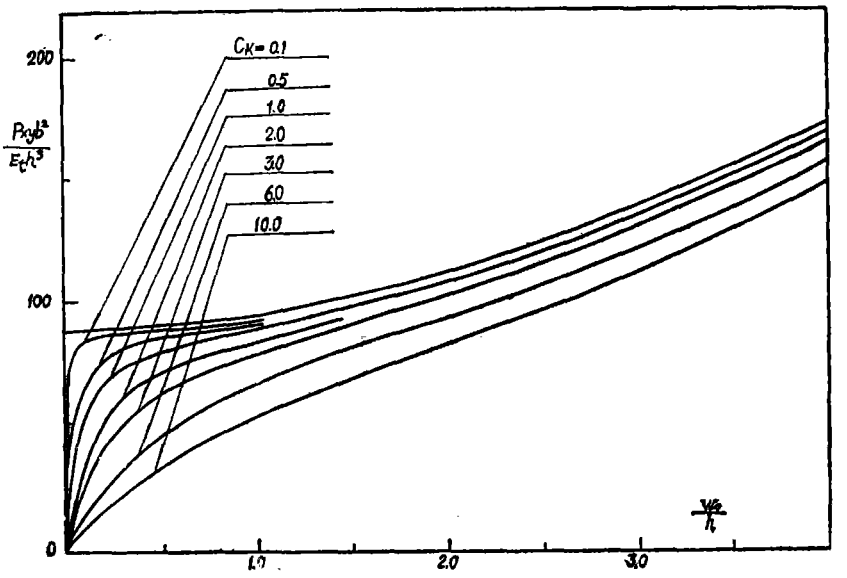

图 2　剪切与侧压联合作用下碳/环氧层板的弯曲变形

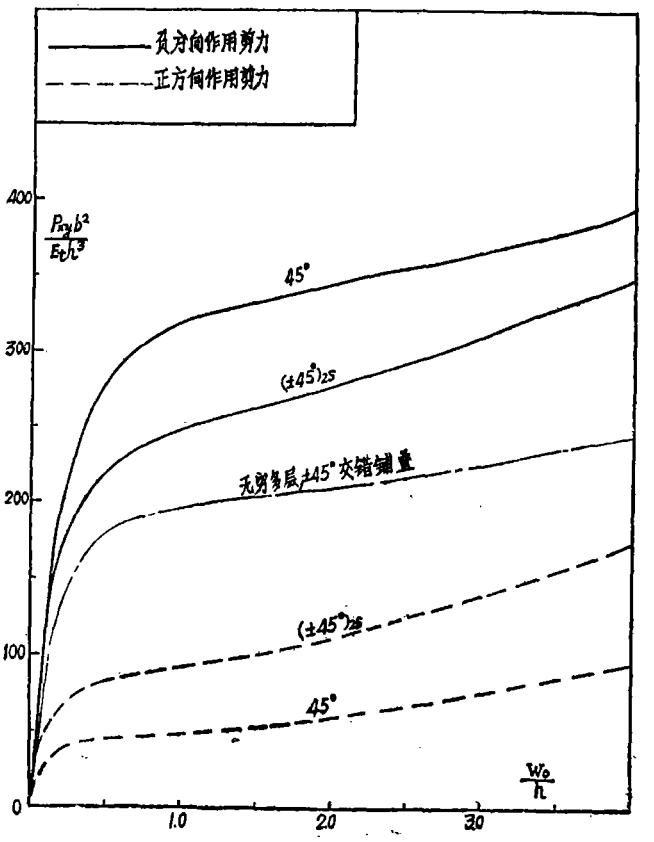

图 3　对称层板的弯曲

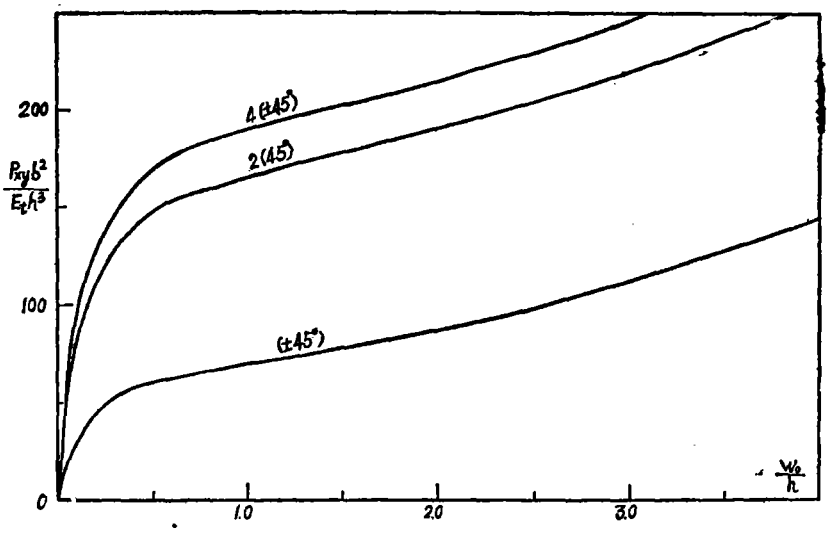

图 4　反对称层的板弯曲

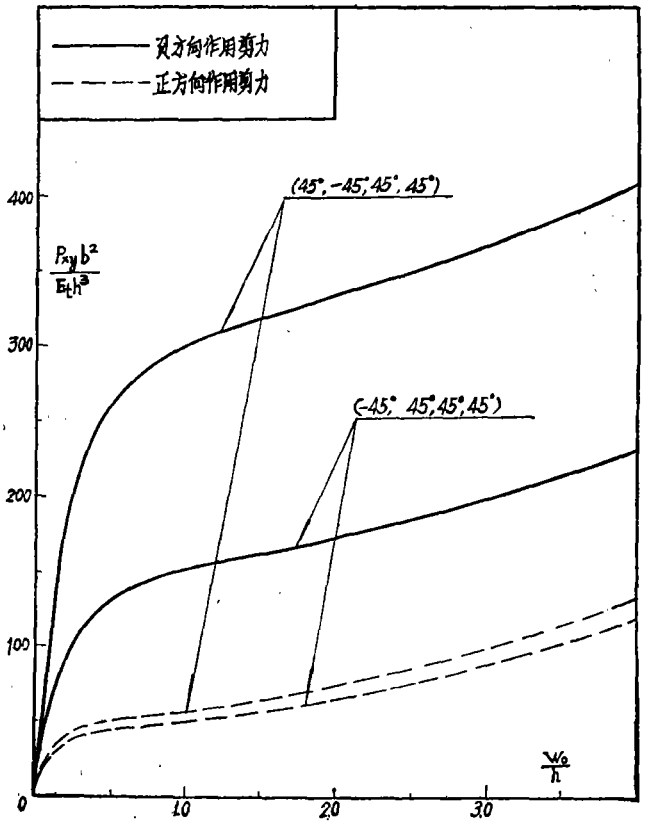

图 5　非对称层板的弯曲

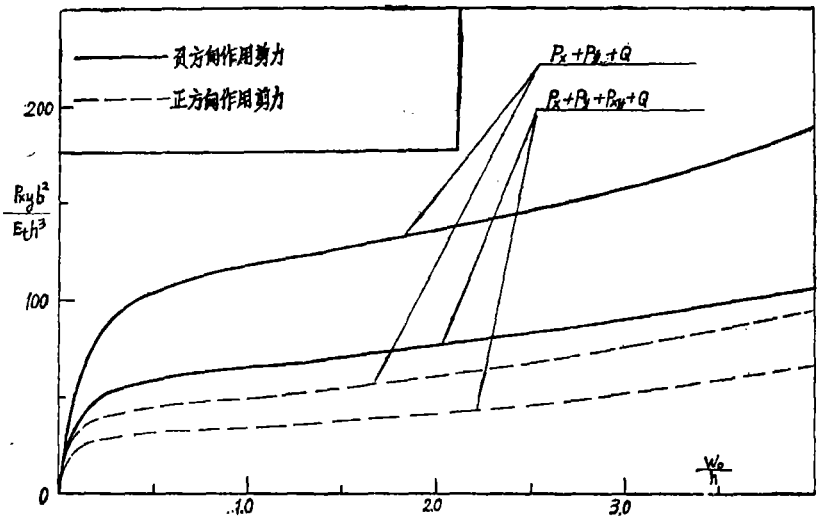

图 6　不同复合载荷条件下层板的弯曲

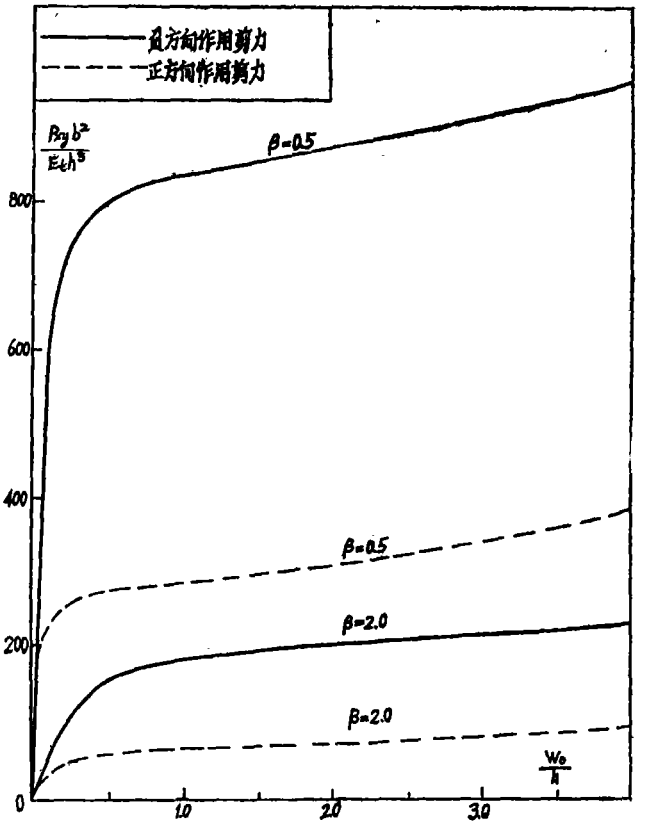

图 7　不同 β 的层板的弯曲变形

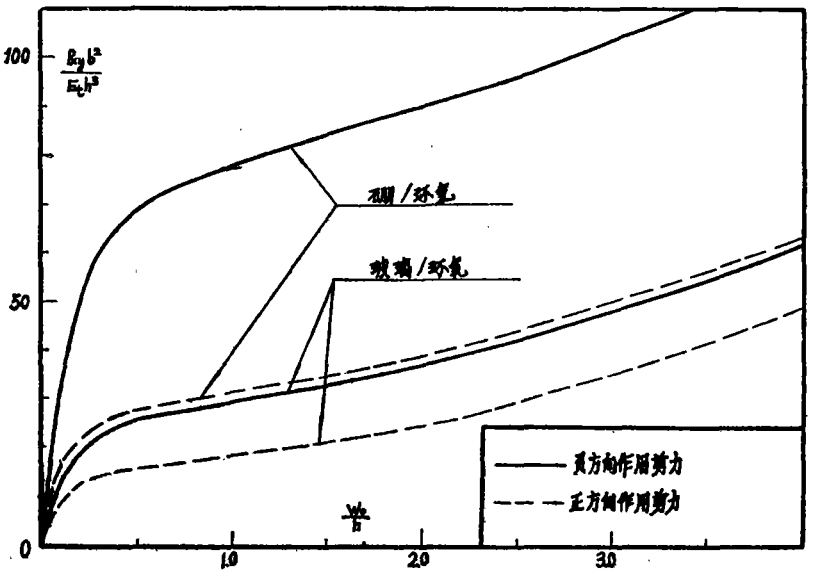

图 8　不同材料的层板的弯曲变形

［资料简讯］

《人造大理石（聚酯混凝土）技术资料汇集》

复印的該技术資料汇集（近200頁）收集有关人造大理石的技术資料30篇，內容丰富，有实用性，两冊收成本費40元。欲购者可汇款至“北京859信箱董永祺”或“工商銀行北京市管庄分理处8901—130玻璃鋼”。

参 考 文 献

[1] Ashton, J. E. and Whitney, J. M., Theory of Laminated Plates, 1970.

[2] Chia, C. Y., Nonlinear Analysis of Plates, 1980.

[3] Leissa, A. W., Advances in Vibration, Buckling and Postbuckling Studies on Composite Plates, Composite Structures, Proc. of Int. Conf. on Composite Structures, U. K., 1981.

[4] Vinson, J. R. and Chou, T. W., Composite Materials and Their Use in Structures, 1975.

[5] Zhang, Y. and Matthews, F. L., Initial Buckling of Curved Panels of Generally Layered Composite Materials, J. Composite Structures, Vol. 1, No. 1, 1983.

[6] Zhang, Y. and Matthews, F. L., The Effect of the Direction of Shear on the Buckling of Laminated Plates Subjected to Combined Shear and Compressive Loading, Proc. ICCM-4, Tokyo, Japan, 1982.

[7] Zhang, Y. and Matthews, F. L., Postbuckling Behaviour of Anisotropic Laminated Plates under Pure Shear and Shear Combined With Compressive Loading, AIAA J., Vol. 22, No. 2, 1984.

[8] Zhang, Y., Buckling and Postbuckling Behaviour of Generally Layered Composite Panels, Ph. D. Thesis, University of London, Oct. 1982.

[9] Jones, R. M., Mechanics of Composite Materials, 1975.

[10] Волбмир, А. С., Гибкие Пластинки и Оболочки, Москва, 1956.

附表 1　常数α_i和γ_i的值

i	α_i	γ_i
1	4.73004074486270	0.982502214576238
2	7.85320462409584	1.000777311907269
3	10.9956078380016	0.999966450125409
4	14.1371654912575	1.000001449897656
5	17.2787596573995	0.999999937344383
6	20.4203522456260	1.000000002707595
7	23.5619449020404	0.999999999882994
8	26.7035375555082	1.000000000005056
9	29.8451302091033	0.999999999999781

附表 2　材料性能参数

项　　目	硼/环氧	碳/环氧	玻璃/环氧
E_L/E_T	10	40	3
ν_{LT}	0.30	0.25	0.30
G_{LT}/E_T	0.25	0.50	0.50

［統计资料］

日本FRP产量

分　类	1980	1981	1982	1983	1984 1～6月	1984 予测
建筑材料	24.3	23.3	24.7 (106)	23.2 (94)	11.8	27.0 (116)
住宅設备	71.5	68.4	80.1 (117)	89.3 (111)	45.3	95.0 (106)
船舶舟艇	44.9	43.6	39.8 (91)	37.7 (95)	16.5	37.0 (98)
汽車車輛	4.3	5.1	4.9 (97)	4.9 (100)	3.5	5.0 (102)
儲罐容器	29.8	28.7	32.0 (111)	33.2 (104)	16.4	35.0 (105)
工业器材	23.5	23.2	24.8 (107)	29.6 (119)	14.3	30.0 (101)
杂　品	10.9	12.7	13.2 (104)	15.6 (118)	9.1	15.0 (96)
其　它	9.7	13.6	13.4 (96)	15.2 (113)	7.0	16.0 (105)
合　計	218.9	218.9	232.9 (106)	248.7 (107)	123.9	260.0 (104)

注：单位为千吨；

（　）中数字为对前一年比率。

（資料来源：日本《**强化塑料**》、日立化成工业資料。）

PULTRUSION OF FILAMENTARY COMPOSITES

Ou Guorong, Chen Zhenbei and Jiao Yangsheng
East China Institute of Chemical Technology, Shanghai, China

(Received June 1984)

Abstract

In this paper we studied the pultrusion method of motor wedges which is composed of polydiphenyl oxide derivatives or xylene formaldehyde unsaturated polyester resins as a matrix and the continuous glass rovings as a reinforcement. The effects of various processing conditions on the properties of the products are studied and discussed. The optimum proecssing conditions are also proposed. It is proved by the epxerimental results that the polydiphenyl oxide derivatives and xylene formaldehyde unsaturated polyester resins are suitable for using in the motors of Class B and motors of Class B, F, H, respectively.

NONLINEAR BEHAVIOUR OF LAMINATED COMPOSITE PLATES UNDER COMBINED LATERAL AND IN-PLANE LOADINGS

Zhang Yao
Nanchang Aircraft Company, Nanchang, China

(Received June 1984)

Asbtract

The present paper investigates nonlioear behavior of arbitrary layered composite rectangular plates under combined uniform lateral and in-plane loading. Governing equations of the plates are referred as a pair of coupled partial differential equations of fourth order. After the basic variables, deflection function and force function, are both represented in the form of series of certain beam characteristic functions, the governing equations are reduced to a set of nonlinear algebraic equations. The emphasis of the present investigation is put on the effect of the direction of applied shear on the bending behaviour of the plates. A series of plates with different parameters are calculated. The results of calculations show that the shear directions have significant effect on the bending behaviour of both symmetrical ant unsymmetrical laminates.