

一个单向纤维增强复合材料 强度的概率模型

王 彪 王殿富

(哈尔滨工业大学力学系)

摘 要

本文应用强度统计分析中的最弱环理论,根据纤维束的强度分布,提出了预测单向增强复合材料强度分布的概率模型,并用单向层板在拉伸载荷作用下的实验结果进行了验证。

一、引 言

复合材料在强度实验中表现出的较大的分散性迫使人们选择一些统计学方法去进行数据分析、强度预测及探讨复合材料的尺寸效应等。而单向复合材料的强度预测,作为强度分析的基础更引起了人们的重视。

Daniels^[1]用纤维束链概率模型,根据纤维的强度分布,探讨了单向纤维增强复合材料的强度分布。Harlow和Phoenix^[2~3]进一步发展了这一模型。利用这些模型,对少数(< 9 根)纤维断裂的概率进行了计算。由于问题的复杂性,作者试图通过少量的运算观察曲线的收敛性和预测单向纤维增强复合材料的强度分布。而且所有结果是在每根纤维的断裂对其它纤维的破坏没有动力影响的假定下得到的。实际中复合材料的破坏往往是开始于较少的几根纤维的断裂,尔后马上导致整体的破坏。

本文引入“复合材料强度基本环”的概念,应用最弱环理论描述复合材料的强度分布。通过对纤维断裂强度的分析,得到了单向纤维增强复合材料的强度分布。并用实验结果进行了验证。

二、概 率 模 型

“复合材料强度基本环”的概念是当体积为 V_0 的部分复合材料在载荷作用下发生破坏

本文1985年8月收到

时必将导致整体材料 V 的破坏。 V_0 称为复合材料强度的基本环体积,它是随作用载荷不同而改变的物理量,这一假设对强度服从某一极值分布的复合材料来说是合理的。而且也反映了纤维断裂并非独立进行这一特点。由于纤维等组成物强度的分散性,基本环 V_0 的强度也是具有一定分布的。其在外应力为 σ 作用下,破坏概率为 P_f 。 $N(\sigma)$ 为单位体积的复合材料中含基本环的数目。下面给出最弱环概率模型。

ΔV 体积材料在外应力为 σ 作用下的破坏概率为:

$$N \Delta V P_f \quad (1)$$

由最弱环理论得整体材料(体积为 V)不破坏的概率为:

$$P_s = (1 - N \Delta V P_f)^{V/\Delta V} \quad (2)$$

当 $\Delta V \rightarrow 0$ 时:

$$\begin{aligned} P_s &= \lim_{\Delta V \rightarrow 0} (1 - N \cdot \Delta V \cdot P_f)^{V/\Delta V} \\ &= e^{-NVP_f} \end{aligned} \quad (3)$$

故体积为 V 的材料在应力 σ 作用下破坏概率(或强度的分布函数)为:

$$F(\sigma) = P_F = 1 - P_s = 1 - e^{-[N(\sigma) \cdot V \cdot P_f]} \quad (4)$$

若 N 及 P_f 为各点的函数,如非均匀载荷场或杂交复合材料等,则

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left[-\iiint_V N(\sigma) \cdot P_f \, dx \, dy \, dz\right] \quad (5)$$

从以上的讨论中可以发现,应用此模型的关键是确定单位体积内基本环的数目 N 及基本环的强度分布 P_f ,而且这两个量还是互相制约的。

针对单向纤维增强复合材料,强度基本环的长度可取为 δ ,通常称 δ 为无效长度。其强度分布可由纤维束的强度分析理论确定。

在等载荷分配(即当部分纤维断裂后,载荷均匀分配在剩余的纤维上)条件下,考虑由 n 根纤维组成的一纤维束,令随机变量 X_i 是第 i 根纤维的强度,并假定 $X_1, \dots, X_n$ 的分布 $Q(x)$ 。令 $Y_1 \leq Y_n$ 是 $X_1, \dots, X_n$ 由小至大排列的顺序随机变量,令 Z_n 为纤维束(基本环)的强度,它的分布即为 $G_n(\sigma)$ 。由于在纤维束内不破坏的纤维将承担等量载荷,设每根纤维受载 σ ,则纤维束破坏的必要条件为:

$$(Y_1 \leq \sigma) \cap \left(Y_2 \leq \frac{n\sigma}{n-1}\right) \cdots \cap (Y_n \leq n\sigma) \quad (6)$$

式中 $\left(Y_i \leq \frac{n\sigma}{n-i}\right)$ 表示顺序强度值 Y_i 小于载荷 $\frac{n\sigma}{n-i}$ 的事件。

如果有一个不等式不满足,纤维束也不会破坏,则

$$Z_n = \max\left[Y_1, \frac{n-1}{n} Y_2, \dots, \frac{1}{n} Y_n\right] \quad (7)$$

由(7)式可知 Z_n 同纤维的顺序强度值 $Y_1, \dots, Y_n$ 的联系是很直接的,这也主要由于对于等载荷分布规律,纤维的几何排列形式对其没有影响,这样可以得到基本环强度分布的解析表达式 G_n ,故

$$\begin{aligned}
 G_1(\sigma) &= Q(\sigma) \\
 G_2(\sigma) &= 2Q(2\sigma) \cdot Q(\sigma) - Q^2(\sigma) \\
 G_3(\sigma) &= 6Q(\sigma)Q\left(\frac{3}{2}\sigma\right)Q(3\sigma) - 3Q^2\left(\frac{3}{2}\sigma\right)Q(\sigma) - 3Q^2(\sigma)Q(3\sigma) + Q^3(\sigma) \\
 &\dots\dots \\
 G_n(\sigma) &= \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} \binom{n}{i} Q^i(\sigma) G_{n-i}\left(-\frac{n\sigma}{n-1}\right) \quad \sigma \geq 0
 \end{aligned} \tag{8}$$

其中 $Q(\sigma)$ 为长为 σ 的纤维的强度分布。

局部载荷分配法则：局部载荷分配法则主要考虑的是应力集中的影响。与断裂纤维相邻的未断纤维将承担主要应力，而对较远的纤维影响较小。纤维的排列方式对于基本环的强度分布 $G_n(\sigma)$ 是有影响的。这里认为纤维的排列是呈环形的，如图1。应力集中因子为：

$$K_r = 1 + r/2 \tag{9}$$

其中 r 是断裂的毗邻纤维的序号。相当于描述了距断裂纤维的距离。

对四根纤维组成的基本环根据顺序纤维强度 $Y_1 \leq Y_2 \leq Y_3 \leq Y_4$ 列出了六种存在的排列方案（如表1）。对不同的排列方案可得到不同的基本环强度分布。将六种可能的排列得到的结果依概率加起来即得到了四根环状排列的纤维所组成的基本环的强度分布 $G_4(\sigma)$ 。由于载荷分配及几何排列的对称性，几种排列方案基本环的破坏与否将取决于同一条件。这些条件均列于表2中。为了方便计算，重新对这些条件的安排结果列于表3中。

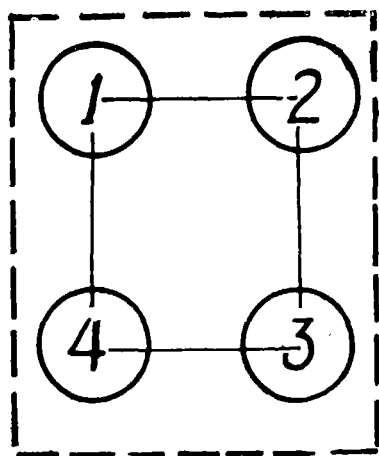


图1 纤维排列图

表1 排列方案

	a		b	
1	Y_1	Y_2	Y_1	Y_3
	Y_3	Y_4	Y_2	Y_4
2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_4
	Y_4	Y_3	Y_2	Y_3
3	Y_1	Y_3	Y_1	Y_4
	Y_4	Y_2	Y_3	Y_2

表2 破坏条件

1a, 1b, 2a, 2b	$Y_1 \leq \sigma; \quad Y_2 \leq \frac{3}{2}\sigma; \quad Y_3 \leq 2\sigma; \quad Y_4 \leq 4\sigma$
3a, 3b	$Y_1 \leq \sigma, \quad \sigma \leq Y_2 \leq \frac{3}{2}\sigma, \quad Y_3 \leq \frac{3}{2}\sigma, \quad Y_4 \leq 4\sigma$
	$Y_1 \leq \sigma, \quad Y_2 \leq \sigma, \quad Y_3 \leq 2\sigma, \quad Y_4 \leq 4\sigma$

表3 破坏条件的重新组合

1a, 1b, 2a, 2b	$Y_1 \leq \sigma; Y_2 \leq \frac{3}{2}\sigma; Y_3 \leq 2\sigma; Y_4 \leq 4\sigma$
3a, 3b	$(Y_1 \leq \sigma; Y_2 \leq \sigma; Y_3 \leq 2\sigma; Y_4 \leq 4\sigma) \cup$ $(Y_1 \leq \sigma; Y_2 \leq \frac{3}{2}\sigma; Y_3 \leq -\frac{3}{2}\sigma; Y_4 \leq 4\sigma) -$ $(Y_1 \leq \sigma; Y_2 \leq \sigma; Y_3 \leq -\frac{3}{2}\sigma; Y_4 \leq 4\sigma)$

对于 $\alpha \leq \beta \leq \gamma \leq \nu$, 定义 $P(\alpha, \beta, \gamma, \nu)$ 为:

$$P(\alpha, \beta, \gamma, \nu) = \text{概率}(Y_1 \leq \alpha, Y_2 \leq \beta, Y_3 \leq \gamma, Y_4 \leq \nu) \quad (10)$$

由次序统计学可知:

$$\begin{aligned}
 P(\alpha, \beta, \gamma, \nu) &= \int_0^\alpha \int_{x_1}^\beta \int_{x_2}^\gamma \int_{x_3}^\nu 4! dF(x_4) dF(x_3) dF(x_2) dF(x_1) \\
 &= 24F(\nu)F(\gamma)F(\beta)F(\alpha) - 12F(\nu)F(\gamma)F^2(\alpha) - 12F(\nu)F^2(\beta)F(\alpha) \\
 &\quad + 4F(\nu)F^3(\alpha) - 12F^2(\gamma)F(\beta)F(\alpha) + 6F^2(\gamma)F^2(\alpha) \\
 &\quad + 4F^3(\beta)F(\alpha) - F^4(\alpha)
 \end{aligned} \quad (11)$$

所以四根环状排列纤维组成的基本环强度分布为:

$$G_4(x) = \sum_{i=1}^6 P_r[Z_4 \leq x | i \text{ 种排列方式}] \cdot P_r[i \text{ 种排列方式发生}]。$$

$$\begin{aligned}
 \text{故: } G_4(\sigma) &= \frac{2}{3}P(\sigma, \frac{3}{2}\sigma, 2\sigma, 4\sigma) + \frac{1}{3}[P(\sigma, \sigma, 2\sigma, 4\sigma) + P(\sigma, -\frac{3}{2}\sigma, \\
 &\quad -\frac{3}{2}\sigma, 4\sigma) - P(\sigma, \sigma, -\frac{3}{2}\sigma, 4\sigma)]
 \end{aligned} \quad (12)$$

由 (11) 式得到:

$$\begin{aligned}
 G_4(\sigma) &= 16Q(\sigma)Q(2\sigma)Q\left(\frac{3}{2}\sigma\right)Q(4\sigma) - 4Q(4\sigma)Q(2\sigma)Q^2(\sigma) \\
 &\quad - 4Q(4\sigma)Q^2\left(-\frac{3}{2}\sigma\right)Q(\sigma) + 4Q(4\sigma)Q^3(\sigma) - 8Q^2(2\sigma)Q\left(-\frac{3}{2}\sigma\right)Q(\sigma) \\
 &\quad + 2Q^2(2\sigma)Q^2(\sigma) - 8Q(4\sigma)Q\left(-\frac{3}{2}\sigma\right)Q^2(\sigma) + 4Q^2\left(-\frac{3}{2}\sigma\right)Q^2(\sigma) - Q^4(\sigma)
 \end{aligned} \quad (13)$$

同理可得到 5 根纤维组成的基本环的强度分布为 $G_5(\sigma)$, 这时具有 24 种排列方式:

$$\begin{aligned}
 G_5(\sigma) &= 40Q(5\sigma)Q\left(-\frac{5}{2}\sigma\right)Q(2\sigma)Q\left(-\frac{3}{2}\sigma\right)Q(\sigma) - 10Q(5\sigma)Q\left(-\frac{5}{2}\sigma\right)Q(2\sigma)Q^2(\sigma) \\
 &\quad - 10Q(5\sigma)Q\left(-\frac{5}{2}\sigma\right)Q^2\left(-\frac{3}{2}\sigma\right)Q(\sigma) - 10Q(5\sigma)Q^2(2\sigma)Q\left(\frac{3}{2}\sigma\right)Q(\sigma)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 5Q(5\sigma)Q^2(2\sigma)Q^2(\sigma) + 10Q(5\sigma)Q(2\sigma)Q^3(\sigma) - 30Q(5\sigma)Q(2\sigma)Q\left(\frac{3}{2}\sigma\right)Q^2(\sigma) \\
& + 5Q(5\sigma)Q^2\left(\frac{3}{2}\sigma\right)Q^2(\sigma) + 10Q(5\sigma)Q\left(\frac{3}{2}\sigma\right)Q^3(\sigma) - 5Q(5\sigma)Q^4(\sigma) \\
& - 20Q^2\left(\frac{5}{2}\sigma\right)Q(2\sigma)Q\left(\frac{3}{2}\sigma\right)Q(\sigma) + 5Q^2\left(\frac{5}{2}\sigma\right)Q(2\sigma)Q^2(\sigma) \\
& + 5Q^2\left(\frac{5}{2}\sigma\right)Q^2\left(\frac{3}{2}\sigma\right)Q(\sigma) + 5Q(2\sigma)Q^2\left(\frac{3}{2}\sigma\right)Q^2(\sigma) - 5Q^2(2\sigma)Q^3(\sigma) \\
& + 10Q^2(2\sigma)Q\left(\frac{3}{2}\sigma\right)Q^2(\sigma) - 5Q^2\left(\frac{3}{2}\sigma\right)Q^3(\sigma) + Q^5(\sigma)
\end{aligned} \quad (14)$$

公式(13)及(14)都是复杂的,公式中项数随 n 成 2^n 次增大,而幸运的是本文提出的模型仅需计算的是 n 较小的情况,如果基本环中的纤维数目小于4时,排列方式对强度分布是无影响的,仅需参照等载荷分配法则的方法,加入相应的应力集中系数去解决。

三、计算结果同实验结果的比较及讨论

1. 单位体积内含基本环的数目 $N(\sigma)$ 对破坏概率的影响

由文献[3]中计算结果可知,基本环的强度分布 $G_n(\sigma)$ 随 n 的变化很小,只在很小的破坏概率($<10^{-7}$)内才存在一些。而在本模型中,这个变化不是反映在 $G_n(\sigma)$ 中,而是表现在 $N(\sigma)$ 中,因设基本环内含 n_0 根纤维,单位体积内含 n 根纤维,则

$$N(\sigma) = n/n_0 \quad (15)$$

可见当纤维的含量不变, $N(\sigma)$ 随基本环内的纤维数目 n_0 成反比变化。

由文献[1、2]的讨论中可知,在假定纤维的强度服从Weibull分布

$$Q(\sigma) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^\beta\right] \quad (16)$$

而 σ 又较小的条件下

$$G_n(\sigma) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_n^*}\right)^{n\beta} + O((\sigma^{n\beta}) \quad (17)$$

对于固定的 n , σ_n^* 为常量。将(17)代入(1)中得到

$$\begin{aligned}
F(\sigma) &= 1 - e^{-N(\sigma)G_n(\sigma)} \\
&= 1 - e^{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_n^*}\left(\frac{1}{N(\sigma)}\right)^{\frac{1}{n\beta}}\right)^{n\beta}}
\end{aligned} \quad (18)$$

可见单向复合材料的强度服从一个形状系数为 $n\beta$,位置参数为 $\left(\frac{1}{N(\sigma)}\right)^{\frac{1}{n\beta}} \cdot \sigma_n^*$ 的Weibull分布。

对于 $n\beta=10$,体积为1,对三种不同 $N(\sigma)$ 进行了破坏概率的计算,结果描绘在Weibull概率纸中(图2)。从图中可知 $N(\sigma)$ 对强度分布的影响较大。这实际上反映了纤维破坏的严重相关性。

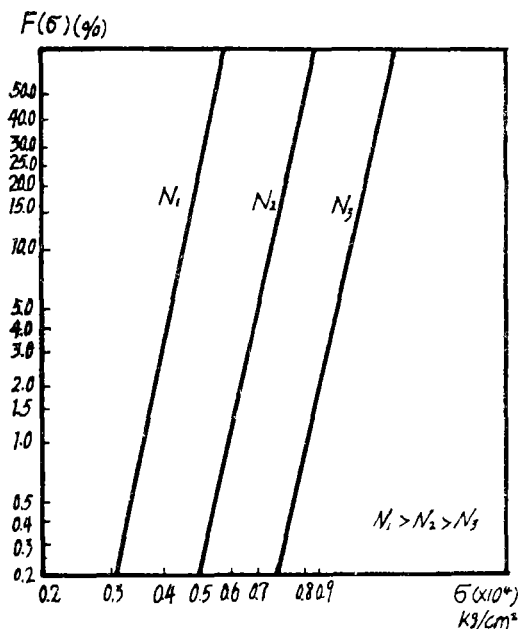


图2 $N(\sigma)$ 对破坏概率的影响

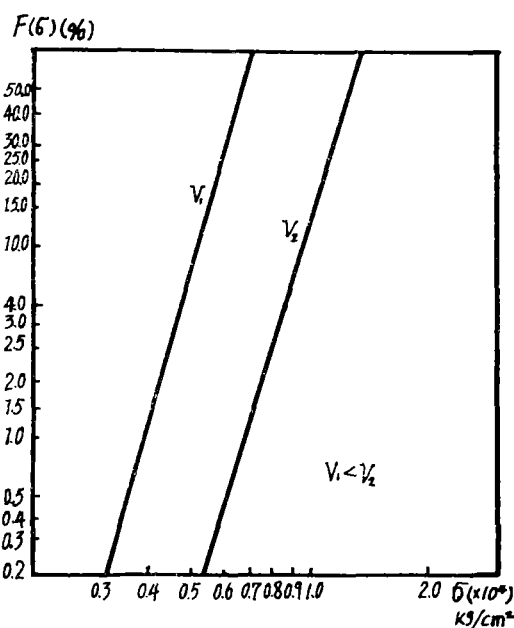


图3 尺寸效应

2. 尺寸效应

本文在 $n=4$, $\beta=5$, $N=10000$ 下对二种不同体积材料的破坏概率进行了计算, 结果示于威布尔概率纸中。由图3可清楚地看到, 随体积增加, 破坏概率增加。

3. 理论计算值同实验结果的比较

本文将理论计算值同[9]中所做的单向增强层板强度实验数据进行了比较。

以单向8层碳/环氧(T300B/648)预浸的无纬布铺叠在一起作成亚铃形试件。试件试验段尺寸为 $30 \times 8 \text{ mm}$, 试件厚 1.2 mm 。试件加固片粘贴采用特殊配料的粘结剂, 使其具有较高的韧性和粘结能力。在10T—Shimadzu电子拉力机上进行拉伸, 发现其强度近似服从Weibull分布, 其分布密度函数为

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha} \right)^{\beta}} \quad (19)$$

其中, α 为位置参数, β 为形状参数, 由样本估计可得到其值, 见(20)式, 实验结果列于表4。

$$\begin{aligned} \alpha &= \left(\frac{\sum_{i=1}^n X_i^{\frac{\beta}{\beta-1}}}{n} \right)^{\frac{\beta-1}{\beta}} \\ \beta &= \left\{ \left(\frac{\sigma}{\pi^2} \right) \left[\sum_{i=1}^n (\ln X_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln X_i \right)^2 / n \right] / (n-1) \right\} \\ \beta &= \frac{1}{\bar{\beta}} \end{aligned} \quad (20)$$

表4 经统计处理的实验结果

参数 $\alpha(kg/cm^2)$	参数 β	均值	方差	偏差系数	95%均值可信区间
11556.7	16.978	10935.7	849.50	7.8	10745.75~11125.65

纤维的强度也可由Weibull分布来描述。

$$Q(\sigma) = 1 - e^{-L\alpha\sigma^\beta} \quad (21)$$

其中 L 为纤维的长度。故纤维长为 $\delta = 1mm$ 时, 其强度分布为^[10]

$$Q(\sigma) = 1 - \exp\left(-\frac{\sigma}{34314.5}\right)^{7.5} \quad (22)$$

针对本问题, 可首先确定基本环内的纤维 $n=2$ 。总体积 $V=8 \times 30 \times 1.2=288mm^3$ 。由于纤维直径为 $8.8\mu m$, 纤维在无纬布中体积含量为60%, 而得到一根长为 $\delta=1mm$ 的纤维体积为:

$$V' = \frac{\pi}{4} d^2 \delta = \frac{1}{4} \times 3.14 \times (8.8 \times 10^{-3})^2 = 6.08 \times 10^{-5} (mm^3) \quad (23)$$

故长为 δ 的单位体积内含纤维根数为:

$$n_0 = \frac{0.6}{V'} = \frac{0.6}{6.08 \times 10^{-5}} = 9.87 \times 10^3 \quad (24)$$

由式(15)可得单位体积含基本环数目为:

$$N(\sigma) = \frac{n_0}{n} = 9.87 \times 10^3 / 2 = 4935 \quad (25)$$

故形状参数: $B = n\beta = 2 \times 7.5 = 15$

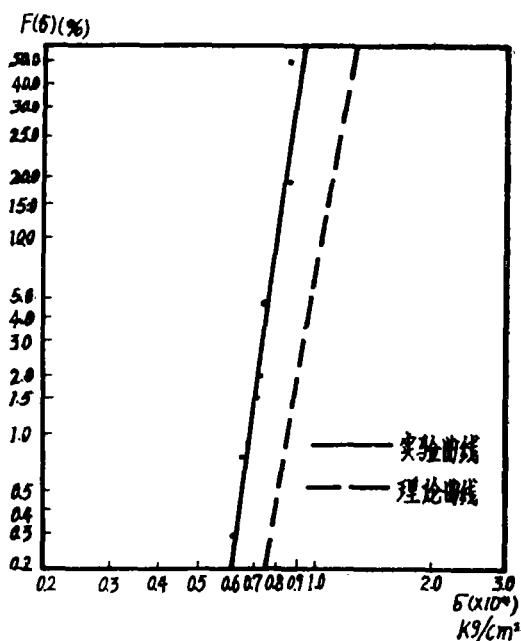
位置参数: $A = \left(\frac{1}{N}\right)^{\frac{1}{n\beta}} \sigma_2^*$

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{1}{4935 \times 288}\right)^{\frac{1}{15}} \\ &\quad \times 0.6753 \times 34314.5 \\ &= 9011.47 (kN/cm^2) \end{aligned}$$

式中 $\sigma_2^* = 0.6753\sigma$ 。

图4中画出了 $n=2$ 时的理论计算曲线及实验曲线, 在破坏概率较大时的曲线不一致性是由于载荷较大时, $G_n(\sigma) =$

$\left(\frac{\sigma}{\sigma_n^*}\right)^{n\beta} + 0(\sigma^{n\beta})$ 的假设不成立的缘故。



四、结 论

1. 本文根据纤维增强复合材料的破

• 80 •

图4 实验值同理论值比较

坏特点,提出了“强度基本环”的概念,用最弱环理论得到了预测单向纤维增强复合材料的强度模型,并用实验结果进行了证实;

2. 由本模型中得到的强度服从Weibull分布且明显地表现出复合材料的尺寸效应。这与许多作者在实验中得到的结果是一致的。

参 考 文 献

- [1] H.E.Daniels, "The statistical theory of the strength of bundles of threads", Proc.Royal Soc. (London), Vol. 183A (1945), 405.
- [2] D.G.Harlow and S.L.Phoenix, "The chain-of-bundles probability model for the strength of fibrous materials I: Analysis and conjectures", J.Composite Materials, Vol.12 (1978).
- [3] D.G.Harlow and S.L.Phoenix, "The chain-of-bundles Probability model for the strength of fibrous materials II: A numerical study of convergence", J.Composite Materials Vol. 12 (1978).
- [4] D.G.Harlow and S.L.Phoenix, International Journal of Fracture, 15(1979)321.
- [5] D.G.Harlow and S.L.Phoenix, International Journal of Fracture, 17 (1981).
- [6] D.G.Harlow, "Probability models for the tensile strength of composite materials", PhD Thesis, Cornell University, Ithaca, New York (1977).
- [7] C.Zweben and B.W.Rosen, "A statistical theory of material strength with application to composite materials", AIAA Paper No. 69123.
- [8] Volkov, S.D., "Statistical strength theory", Gordon and Breach, New York, 1962.
- [9] 闻柏承, "碳/环氧层板和有预制脱层的层板的强度预报", 硕士论文, 哈尔滨工业大学, (1985)。
- [10] W.G.Hart, F.A.Jacobs and J.H.Nassete, "Tensile failure of unidirectional composite materials", NIVR Contract No.1744, Order No.101.323.

[参考资料]

改性PPQ

PPQ (聚苯喹喔啉, Polyphenylquinoxaline) 由四胺、二乙二醛和梯型聚合物合成, 与四羧基二酸酐共聚获得改性PPQ, 具有高弹性, 耐热性极好, T_g 高达 400℃, 碳纤维/改性PPQ预浸料(用FW法)可用来模塑出用于飞行器(要求耐热 370℃)的高性能制品。这种改性PPQ是由日本东丽公司研制的。

光固化树脂

1983年6月D.Scholy在西德发表一种内含光引发剂的光固化树脂。用这种树脂可以制造SMC、DMC和预浸粗纱。预浸粗纱(玻纤重量含量75%)用于缠绕成型可提高缠绕速度,又可节省能源。将光固化树脂与短切玻纤混合制成类似牙膏的糊状,装在筒内,可用来修补已安装好的FRP制品以及缠绕成型的管、容器等,使用方便。

(刘宝译,本刊有删改)

FREQUENCY ANALYSIS OF THICK COMPOSITE LAMINATES

Sheng Hongyu and Li Zhengxiu

*Department of Applied Mathematics and Mechanics
Hefei Polytechnic University, Hefei, China*

(Received November 1985)

ABSTRACT

The paper deals with the vibration analysis of thick composite laminates. For the purpose of good accuracy and efficiency, the paper introduces the elastic theory of isotropic material thick plate and presents a new refined theory of laminated plates and gives some theoretical solutions under certain particular boundary conditions. For general cases, the paper extends the finite element method to the dynamic analysis of the composite laminated plates, and develops a new element which accounts for the shear deformation, in-plane displacements and rotatory inertia effects. An effective method, mass condensation, is used to solve the eigenvalue problems. Numerical calculations are carried out in micro-electronic computer and the results illustrate that the method has good accuracy and convergence. Comparisons are made with existing results, both theoretical and experimental.

A STATISTICAL STRENGTH MODEL FOR UNIDIRECTIONAL COMPOSITES

Wang Biao and Wang Dianfu

*Department of Mechanics
Harbin Institute of Technology, Harbin, China*

(Received August 1985)

ABSTRACT

A weakest-chain statistical model is proposed to predict the strength of unidirectional

fiber reinforced composite material using the chain-handle strength and is testified by the tension experiments of unidirectional laminates. According to this statistical strength model, the strength of unidirectional fiber reinforced composite materials is in accordance with Weibull distribution, $F(\sigma) = 1 - \exp\left\{-\sigma / \left(\frac{1}{N}\right)^{\frac{1}{n\beta}} \sigma_n^{\frac{n}{n\beta}}\right\}^{n\beta}$, when the fiber strength is Weibull distribution, $Q(\sigma) = 1 - \exp(\sigma/\sigma_0)^\beta$. The Weibull strength distribution can demonstrate obvious size effect. The conclusion agrees well with other author's.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF ELASTIC CONSTANTS FOR UNIDIRECTIONAL COMPOSITES

Wang Bingquan and Yang Jinping

Harbin FRP Institute, Harbin, China

(Received October 1985)

ABSTRACT

This paper reviewed a lot of existing formulas for predicting the elastic constants of unidirectional composites. The results predicted from these formulas were compared with experimental data for unidirectional Glass/Epoxy and Graphite/Epoxy composites. Some of the formulas were recommended for calculating the elastic constants of unidirectional composites.

HYBRID MODEL OF COMPOSITE LAMINATS AND ITS APPLICATIONS

Liu Zhengxing

*Department of Engineering Mechanics
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China*

(Received November 1985)

ABSTRACT

The hybrid stress model for fiber reinforced composite laminates is derived by the

• VI •