

碳纤维复合材料强度的 复合 Weibull 分布模型

李正旺 秦志敬
(北京航空材料研究所)

本文用图分析法按三参数复合 Weibull 分布模型对碳纤维复合材料层板静态拉伸强度和疲劳剩余强度进行了统计分析,并结合失效机理对分布模型进行了讨论。结果表明,这一分布模型能够更全面地描述复合材料层板静态强度和疲劳剩余强度的统计特性。

Mixed Weibull Distribution Model for Strength of CFRP

Li Zhengwang Qin Zhijing
(Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

The static tensile strength and residual fatigue strength of carbon epoxy laminates were analyzed statistically by graphic method according to mixed three-parameter Weibull distribution model in this investigation. And the distribution model was discussed combined with the failure mechanism also. The results showed that the statistical characteristic for static strength and residual fatigue strength of carbon epoxy laminates could be properly described by this distribution model.

一、前 言

众所周知,由于成型工艺等原因使得纤维增强复合材料的强度特性具有较大的分散性。因此,必须用统计分析的方法找出其概率分布规律,定量地给出使用这一材料的可靠程度,为设计和使用者提供依据。

近年来的许多研究结果^{〔1, 2, 3〕}表明,用 Weibull 分布能够很好地表达纤维增强复合材料的强度分布规律。但是,绝大多数研究工作者都是采用单一的分布模型。用单一模型描述材料强度,意味着假定材料的破坏是由单一的失效机理造成的。而复合材料的力学行为具有与金属材料不同的特殊表现,存在着不同的失效机理。故此,单一分布模型不能够充分地表达复合材料的强度特性,文献〔4〕根据对 T300/648 (碳/环氧),〔0/90〕_{4s} 层板的试验结果,首次提出了复合材料层板的疲劳剩余强度服从复合 Weibull 分布。本文用三参数复合 Weibull 分布模型对碳纤维复合材料的静态强度和疲劳剩余强度作了进一步的分析。结果表明:该模型能够使 Weibull 分布这一“适用性广泛的分布”对复合材料的强度特性充分发挥其应有的优越性。故此,本文提出采用三参数复合 Weibull 分布描述复合材料的强度特性更为适宜。

二、试验及 Weibull 概率图分析

本文用〔45/0/45/-45/0/45/0/-45〕_s, T300/648 (碳/环氧)层板进行了静态拉伸和拉—

压疲劳后的剩余拉伸强度试验。试验前对试样进行了吸湿预处理,试样平均含水量为 0.72%。试验环境条件为:100℃、湿蒸汽。试验结果见表 1、表

表1 〔45/0/45/-45/0/45/0/-45〕_s
层板静拉强度概率图分析数据表

序号 i	统计量 t(i)	变量置换 t'(i)	中位秩 F(t _i), %
1	457	7	4.24
2	499	49	10.34
3	531	81	16.44
4	534	84	22.54
5	555	105	28.65
6	555	105	34.75
7	584	134	40.85
8	584	134	46.95
9	585	135	53.05
10	588	138	59.15
11	588	138	65.25
12	615	165	71.35
13	677	227	77.46
14	689	239	83.56
15	698	248	89.66
16	711	261	95.76

注: (1) t(i)及 t'(i)单位均为 MPa;

(2) 变量置换 $t'(i) = t(i) - \gamma_0$, $\gamma_0 = 450 \text{ MPa}$ 为位置参数估计值。

2. 表中以最小观察值 t_1 作为位置参数 γ 的估计值, 对材料强度作了变量置换。

表 2 $[45/0/45/-45/0/45/0/-45]$ 层板
剩余拉伸强度概率图分析数据表

序号 i	统计量 $t(i)$	变量置换 $t'(i)$	中位秩 $F(t_i)\%$
1	529	9	4.52
2	556	36	11.01
3	569	49	17.51
4	604	84	24.01
5	651	131	30.51
6	652	132	37.00
7	655	135	43.50
8	663	143	50.00
9	698	178	56.50
10	720	200	63.00
11	720	200	69.49
12	728	208	75.99
13	750	230	82.49
14	753	233	88.99
15	754	234	95.48

注: (1) $t(i)$ 及 $t'(i)$ 单位均为 MPa;

(2) 变量置换 $t'(i) = t(i) - \gamma_0$, $\gamma_0 = 520\text{MPa}$ 为位置参数估计值;

(3) 剩余拉伸强度试验条件: U.T.S. = 591MPa, $K = 0.35$, $f = 15\text{Hz}$, $R = -1$, $N_0 = 1 \times 10^5$ 。

表 3、表 4 列出了文献〔2〕中给出的 0° 单向碳/环氧层板的静拉强度和拉-拉疲劳后的剩余拉伸强度数据。

通过对以上数据进行分析和研究, 可以看出无论是静态拉伸强度还是疲劳剩余强度数据经过 Weibull 概率分布的分析, 均得到基本一致结论——复合材料层板的拉伸强度或疲劳剩余强度均可用三参数 Weibull 分布来描述, 其 Weibull 分布曲线可由两个基本线性函数表示, 即为复合 Weibull 分布。参见图 1 到图 4。

由图 1 可以获得 $[45/0/45/-45/0/45/0/-45]$ 层板静拉强度的三参数复合 Weibull 分布参数的估计值并由下列函数表示:

$$F(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq \hat{\gamma}_0 \\ 1 - e^{-\left(\frac{t - \hat{\gamma}_0}{2550}\right)^{0.57}} & \hat{\gamma}_0 < t \leq \hat{\delta}_0 \\ 1 - e^{-\left(\frac{t - \hat{\gamma}_0}{613}\right)^{2.15}} & \hat{\delta}_0 < t \end{cases} \quad (1)$$

文献〔5〕认为可以用最小观察值作为位置参数 γ 的估计值。本文考虑到 Weibull 概率纸具体情况, 故取 γ 的估计值略低于最小观察值。

表 3 0° 单向板静拉强度概率图分析数据表

序号 i	统计量 $t(i)$	变量置换 $t'(i)$	中位秩 $F(t_i)\%$
1	452.3	2.3	3.125
2	462.0	12.0	7.589
3	469.7	19.7	12.05
4	483.5	33.5	16.52
5	497.6	47.6	20.98
6	498.7	48.7	25.45
7	521.4	71.4	29.91
8	537.7	87.7	34.38
9	548.4	98.4	38.84
10	562.7	112.7	43.30
11	563.9	113.9	47.77
12	569.4	119.4	52.23
13	594.6	144.6	56.70
14	623.2	173.2	61.16
15	638.3	188.3	65.63
16	657.6	207.6	70.09
17	661.6	211.6	74.55
18	662.9	212.9	79.02
19	673.0	223.0	83.48
20	700.6	250.6	87.95
21	713.8	263.8	92.41
22	714.9	264.9	96.88

注: (1) $t(i)$ 及 $t'(i)$ 单位均为 MPa;

(2) 变量置换 $t'(i) = t(i) - \gamma_0$, $\gamma_0 = 450\text{MPa}$ 为位置参数估计值。

表 4 0° 单向板剩余拉伸强度概率图分析数据表

序号 i	统计量 $t(i)$	变量置换 $t'(i)$	中位秩 $F(t_i)\%$
1	454.8	4.8	4.52
2	548.9	98.9	11.01
3	573.0	123.0	17.51
4	574.8	124.8	24.01
5	591.5	141.5	30.51
6	628.6	178.6	37.00
7	652.6	202.6	43.50
8	703.0	253.0	50.00
9	726.2	276.2	56.50
10	733.5	283.5	63.00
11	738.7	288.7	69.49
12	785.4	335.4	75.99
13	805.8	355.8	82.49
14	809.6	359.6	88.99
15	814.0	364.0	95.48

注: (1) $t(i)$ 及 $t'(i)$ 单位均为 MPa;

(2) 变量置换 $t'(i) = t(i) - \gamma_0$, $\gamma_0 = 450\text{MPa}$ 为位置参数估计值;

(3) 剩余拉伸强度试验条件: U.T.S. = 582.2MPa,

$\sigma_{\max} = 392\text{MPa}$, $R = 1/36$, $f = 10\text{Hz}$, $N_0 = 8000$, 疲劳试验前以 $\sigma_0 = 510\text{MPa}$ 对试样进行预拉伸。

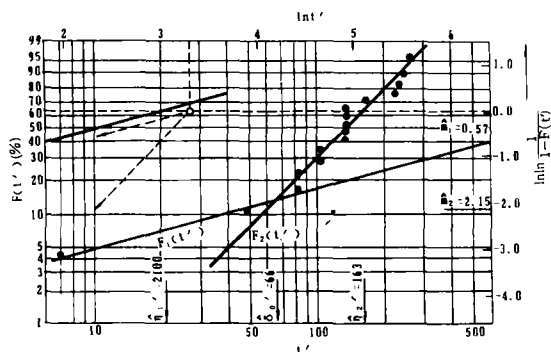


图1 $(45/0/45/-45/0/45/0/-45)$ 层板静态拉伸强度复合 Weibull 分布图

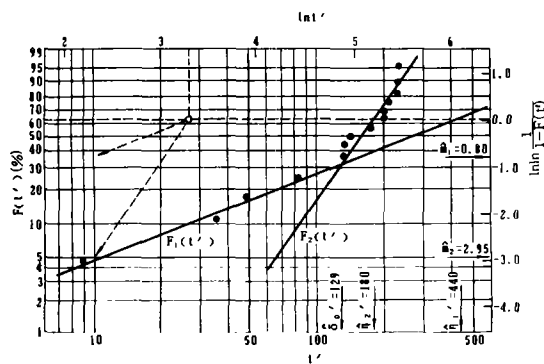


图2 $(45/0/45/-45/0/45/0/-45)$ 层板剩余拉伸强度复合 Weibull 分布图

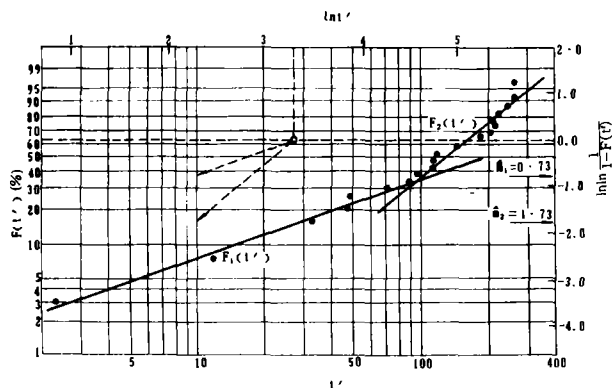


图3 碳/环氧 0° 单向板静态拉伸强度复合 Weibull 分布图

式中: $\hat{\delta}_0 = \hat{\delta}_0' + \hat{\gamma}_0 = 516\text{MPa}$ 为转折参数。

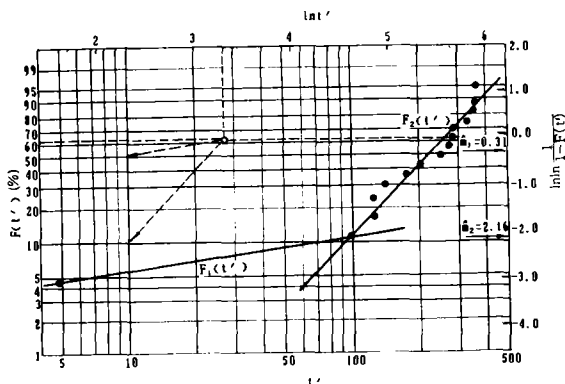


图4 碳/环氧 0° 单向板剩余拉伸强度复合 Weibull 分布图

该层板剩余拉伸强度的三参数复合 Weibull 分布的参数估计可由图 2 得到。其函数表示如下:

$$F(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq \hat{\gamma}_0 \\ 1 - e^{-\left(\frac{t - 520}{960}\right)^{a_1}} & \hat{\gamma}_0 < t \leq \hat{\delta}_0 \\ 1 - e^{-\left(\frac{t - 520}{700}\right)^{a_2}} & \hat{\delta} < t \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\hat{\delta}_0 = \hat{\delta}_0' + \hat{\gamma}_0 = 649\text{MPa}$ 为转折参数。

由图 3、图 4 也可以得到类似的结果。尽管图 4 中第一函数的数据尚不充分——仅有两个失效点,但这种分布的函数趋势是明显的。

三、结果分析

对于复合材料层板的静拉强度和疲劳剩余强度具有三参数复合 Weibull 分布特征进行了如下初步分析。

从上述具体数据的分析结果来看,碳纤维复合材料的静拉强度及疲劳剩余强度符合复合 Weibull 分布,存在着早期失效和耗损失效^[6, 7]的组合特征。许多实验研究表明,复合材料失效(破坏)的机理是由基体开始向增强纤维扩展,且在最薄弱环节首先失效(破坏源)^[8]。复合材料的组合结构使它们的力学行为具有特殊表现——失效的阶段性(参见式(1)、式(2)和图 1~4)。这种阶段性包括所谓早期失效和耗损失效的一般规律;同时也描述碳纤维复合材料的特殊失效机理,即所谓基体型破坏和纤维型破坏模

型融为一体的特征。

众所周知, Weibull 分布的形状参数 (m) 是与材料的失效机理相联系的, 不同的 m 值对应着不同的失效特征。由 Weibull 分析函数和图析均表明碳纤维复合材料的力学行为是分阶段的, 在转折点前后的失效机理是截然不同的, 明显地表现了复合 Weibull 分布特征。由图 1 到图 4 可见, 对应于 F_1 的形状参数 m_1 均小于 1, 对应于 F_2 的形状参数 m_2 均大于 1, 从而充分说明, 对同一种材料由于其本身的实质特性而融两种不同失效机理于一体。其中也包含所谓失效 (浴盆) 曲线所描述的产品一般失效规律在内, 就是说, F_1 包含早期失效概率, F_2 包含耗损失效率。所以, 在使用 Weibull 分布函数和曲线时要考虑这些因素, 在可靠性的基础上选取材料应有的特征值。看来, 按 F_1 选择使用参数如平均强度、最大无失效强度等提供设计参考是适宜的。

四、初步印象

1. 本文的实验数据处理结果是有物理分析基础的, 与实验结果是一致的。

2. 碳纤维复合材料的静拉强度及疲劳剩余强度是符合三参数复合 Weibull 分布的, 这一分布模型能够较全面地反映和描述碳纤维复合材料层板强度的统计

特性。

3. 碳纤维复合材料的力学行为可以认为是所谓早期失效、耗损失效以及树脂型、纤维型破坏机理的综合组合行为。这一特性可由 Weibull 分布的形状参数 (m) 的变化在同一母体 (材料) 中较为清楚地表明。

4. 通过三参数复合 Weibull 分布的参数分析可以为工程设计人员提供具有一定可靠性的参考数据。

参考文献

- (1) Yang, J.N. and Liu, M.D, J. of Composite Materials, Vol.11, Apr.1977, pp.176~203.
- (2) Radhakrishnan, K., J. of Composite Materials, Vol.18, Jan.1984, pp.21~31.
- (3) Ramesh Talreja, Fatigue of Fibrous Composite Materials, ASTM STP 723, 1981, pp.291~311.
- (4) 秦志敬, “碳纤维树脂基复合材料拉-压疲劳试验方法研究”, 北京航空材料研究所。
- (5) 方开泰、许建伦, 统计分布, 科学出版社, 1987, P.232.
- (6) J.H.邦帕斯-史密斯著, 张昭华译, 机械的可靠性——可靠性资料的应用, 国防工业出版社, 1981, P.14.
- (7) 戴树森等, 可靠性试验及其统计分析, 上册, 国防工业出版社, 1983, P.106.
- (8) 秦志敬, 航空材料, 1985.4, pp.30~34.

~~~~~  
(上接第 40 页)

长大大加快, 前者的粘度随温度变化的速度比后者快得多。但从图 5 看在 125℃ 下有催化剂的树脂体系在 20 多分钟区间里, 粘度虽在增加, 但并未急剧增长。这就为复合材料成型时有适当宽的加压窗口提供条件, 而不加催化剂的体系, 低粘度时间很长, 而粘度一旦增加又比较快, 为此, 对复合材料成型加压区间的确定造成困难。如表 4 结果所指出的: 加催化剂的体系在 125℃ 即有一定时间 (20 多分钟) 的低粘度区间, 又不过长, 而适合于施压的粘度区间又比较长 (达 40 多分钟), 为复合材料成型加压提供方便条件, 在此范围内均可得到低空隙、高剪切强度的层板。

#### 四、结 论

1. 固化剂用量在 30~60% 范围内变化时, 在理论计算值附近得最高玻璃化温度。但变化仅 6℃ 之

差。即  $T_g$  值对固化剂量在此范围内变化不敏感。

2. 固化剂用量为 45% 时吸湿量最低, 当用量达到 60% 时吸湿量明显增加, 加入偶联剂使吸湿量有所增加。

3. 加三氟化硼单乙胺, 可改变树脂体系的流变行为。用此法可改变固化过程中的粘度特性, 以适合于复合材料成型工艺的需要, 得到一加压窗口较宽、综合性能更为合理的组成。

#### 参考文献

- (1) Morgan, R. J. ftai. August (97) AD-AO-45. 534.
- (2) Aorgan, Jsmes A. Happe and Elems T. Mones, 28th National SAMPE Sym. April, 12-14, 1983, p596.
- (3) 张学忠等, 1983 年复合材料成果资料汇编, P42~67.
- (4) Apicella Luigi Ni colais, 27th National Sym. May, 4-6, 1982, p753.