第4卷 第2期 复合材料学报 Vol.4 No.2
1987年6月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA June 1987

复合材料强度和疲劳性能的误差限度与最少试样个数

杨乃宾

(北京航空学院飞行器設計与应用力学系)

摘 要

本文根据复合材料強度和疲劳性能分散性特点与統計学理論分析結果，探討了复合材料強度和疲劳性能許用值誤差限度的选取与最少試样个数的确定。建議选取最大誤差限度 $\delta_{max}=10\%$。确定A級或B級許用值所需最大試样个数，可由式(1)計算得出，也可按离散系数值查表得出。一般不少于10～15个試样。

一、引 言

复合材料力学性能的显著特点是材料的线弹性与强度的分散性。其疲劳性能的分散性更大。因此，必须在大子样下获得复合材料可靠的强度和疲劳性能数据。本文目的是从复合材料强度和疲劳性能分散性特点出发，利用统计学理论分析结果，置信度、存活率、离散系数、误差限度和观测值个数之间的关系式，给出了复合材料强度和疲劳性能测试数据误差限度与所需最少试样个数。较为合理地处理了数据可靠性与大子样（人力、财力）之间矛盾。

二、强度和疲劳性能分散性特点

碳纤维复合材料强度一些大子样试验结果在表1给出。从这批数据看，碳纤维复合材料强度的离散系数一般在8～11%，而90°拉伸强度则高达19%

复合材料的静强度由纤维的含量和鋪设方向等确定的，其离散系数与纤维本身的离散系数和工艺有关。在相同的工艺条件下，纤维本身的离散系数占着主要的地位。文献[2]给

本文1986年5月4日收到

表1　T 300/684强度数据[1]

		$\bar{X}$(Mpa)	S(Mpa)	Cv(%)	n
0°	σ_{bt}*	1400	145	10.4	39
90°	σ_{bt}	33.9	6.41	18.9	42
0°	σ_{bc}	1030	110	10.7	40
90°	σ_{bc}	167	17.9	10.7	39
±45°	τ_b	65.5	2.53	3.9	30
0°	τ_{bd}	82.6	6.2	7.5	60
0°	τ_{bb}	1590	78	4.9	30
层板**	$0°\sigma_{bt}$	656	64.3	9.8	32
	$0°\sigma_{bc}$	519	51.8	10	25

* 表中σ_{bt}、σ_{bc}分别为拉伸、压縮极限強度，τ_b、τ_{bd}分别为剪切、层間剪切強度。σ_{bb}为弯曲強度

** 层板$[45/0_2/-45/45/0/-45/45/0/-45_2/0/45]_S$

出，中强碳纤维强度拉伸离散系数为10.8%。至于90°拉伸强度，主要由树脂性能控制。而树脂浇注体本身的拉伸强度离散系数就高达20%。文献[2]、[3]中给出，玻璃纤维增强塑料强度性能的离散系数为8～17%。

为了说明复合材料疲劳性能分散性特点，表2给出了单向碳/环氧拉-拉（$R=0.1$）疲劳试验结果。分析表2数据发现，观测值个数（子样大小）$n=15$～50时，离散系数$C_v=14$～6%，存活率$p=90\%$的安全寿命$\bar{X}_{90}=4.65$～4.85。由此可见，复合材料疲劳性能的分散性比强度的分散性大得多，其离散系数为强度性能的离散系数的1.5倍以上，但趋于稳定，仅在较小范围内变化。

表2　单向碳/环氧拉一拉（R＝0.1）疲劳对数寿命数据[4～6]

$\sigma_{max}=470$MPa(48kgf/mm²)

n	$\bar{X}$	S	C_v(%)	$\bar{X}_{90}$
5	4.99513	0.36226	7.252	4.53071
6	5.06418	0.36550	7.217	4.59560
7	5.01503	0.35809	7.140	4.55595
8	5.04661	0.34335	6.803	4.60643
9	5.18612	0.52755	10.172	4.50980
10	5.33208	0.67835	12.725	4.46243
15	5.71819	0.82873	14.492	4.65575
20	5.75823	0.78250	13.589	4.75506
25	5.79077	0.85208	14.714	4.69840
30	5.88990	0.88315	14.994	4.75770
35	5.89331	0.92917	15.766	4.70211
40	5.92203	0.87351	14.750	4.80219
45	5.99215	0.92000	15.353	4.81271
50	6.00455	0.88420	14.725	4.87100

应该指出，疲劳性能的离散系数与所施加的应力水平高低有关。随着施加应力水平的下降，疲劳性能的分散性加大，即离散系数值变大。

三、誤差限度与最少試样个数

统计学理论分析结果[6～8]表明，置信度r、存活率p、离散系数 $C_v=s/\bar{X}$、误差限度δ_{max}和观测值个数n之间应满足下式：

$$\frac{\delta_{max}}{t_r\sqrt{\frac{1}{n}+U_p^2(\beta^2-1)}-\delta_{max}U\cdot\beta}\geqslant C_v \qquad (1)$$

式中，t_r当给定置信度γ和自由度$r=n-1$时，其值可由t分布数值表查得；U_p为与存活率相关的标准正态偏量。当给定存活率p时，U_p可由表查得；β为标准差修正系数，根据子样大小n，其值可由表查得。

离散系数C_v是材料性能分散性的反映。置信度r、存活率p和误差限度δ_{max}是根据实际情况约定的。美国有关设计手册给出许用值的基准有两个[9]。“A”基准：所示出的机械性能值是一个极限值，该值的选取条件是要求在95%置信度下至少有99%数值群的性能值高于它。“B”基准：所示出的机械性能值也是一个极限值，该值的选取条件是要求在95%置信度下至少有90%数值群的性能值高于它。约定置信度和存活率后，方程（1）就是离散系数、误差限度和观测值个数(子样大小)的关系表达式。用存活率$p=50\%$简化方程(1)，可得离散系数与误差限度成正比，而与观测值个数的平方根$\sqrt{n}$成正比。对某一离散系数值，适当扩大误差限度，可以明显地减少观测值个数，即明显地减少所需试样个数。从表3，复合材料B级许用值一些计算结果，可以看出这一点。一般金属材料，如3号钢屈服极限离散系数

表3　复合材料B级许用值一些计算结果

	C_v（%）	δ_{max}（%）	n
静强度	8～11	5	25～
		7.5	13～24
		10	9～15
疲　劳	14～15	10	24～28

为8%[8]，中等寿命离散系数对铝合金和中强钢为3～4%，超高强钢为5～6%[10]，它们的误差限度取$\delta_{max}=5\%$；对于性能具有较大分散性的复合材料，建议取误差限度$\delta_{max}=10\%$。这样，复合材料强度值B级许用值测试，最少需10～15根试样。复合材料疲劳性能测试所需最少试样个数，与应力水平高低和许用值基准有关。B级许用值，一个应力水平也要需20～30根试样。若考虑到疲劳性能测试时，离散系数有趋于稳定的趋势，一个应力水平取15个试样也是必要的。

为了使用方便，本文给出了误差限度$\delta_{max}=10\%$时，A级和B级许用值所需最少观测值个数表（表4）。

表4 最少观测值个数

$\gamma=95\%$, $p=99\%$, $\delta_{max}=10\%$		$\gamma=95\%$, $p=90\%$, $\delta_{max}=10\%$	
离散系数C_v范围	最少观测值个数	离散系数C_v范围	最少观测值个数
<00347	5	<0.0527	5
0.0347～0.0409	6	0.0527～0.0613	6
0.0409～0.0465	7	0.0613～0.0695	7
0.0465～0.0513	8	0.0695～0.0767	8
0.0513～0.0559	9	0.0767～0.0833	9
0.0559～0.0609	10	0.0833～0.0899	10
0.0609～0.0631	11	0.0899～0.0942	11
0.0631～0.0661	12	0.0942～0.0989	12
0.0661～0.0693	13	0.0989～0.1036	13
0.0693～0.0714	14	0.1036～0.1072	14
0.0714～0.0740	15	0.1072～0.1112	15
0.0748～0.0771	16	0.1112～0.1156	16
0.0771～0.0793	17	0.1156～0.1192	17
0.0793～0.0817	18	0.1192～0.1228	18
0.0817～0.0842	19	0.1228～0.1265	19
0.0842～0.0849	20	0.1265～0.1282	20
0.0849～0.0885	21	0.1283～0.1320	21
0.0885～0.0905	22	0.1320～0.1357	22
0.0905～0.0923	23	0.1357～0.1397	23
0.0923～0.0942	24	0.1397～0.1439	24
0.0942～0.0959	25	0.1439～0.1455	25
0.0959～0.0975	26	0.1455～0.1470	26
0.0975～0.0991	27	0.1470～0.1485	27
0.0991～0.1007	28	0.1485～0.1529	28
0.1007～0.1023	29	0.1529～0.1543	29
0.1023～0.1038	30	0.1543～0.1556	30

参 考 文 献

[1] 于德昌等，“高速飞机碳纤维复合材料垂尾壁板的研制”，第四届全国复合材料学术会议论文集（广州，1986年）。

[2] 朱顾龄，“复合材料概率结构设计”，复合材料学报，第2卷，第1期（1985年3月）。

[3] 朱顾龄，“设计玻璃钢/复合材料结构物时的一些考虑”，航空学报，第2卷，第4期（1981年）。

[4] 杨乃宾、傅惠民、高镇同，“单向碳/环氧复合材料拉-拉疲劳性能研究”，复合材料学报，第2卷，第3期（1985年）。

[5] 杨乃宾、傅惠民，“单向碳/环氧复合材料拉一拉疲劳寿命分布”，复合材料学报，第3卷，第2期(1986)。

[6] 高镇同，“疲劳应用统计学”，国防工业出版社，北京(1986)。

[7] Z.Gao, “The Confidence Level and Determination of the Minimum of Specimens in Fatigue Testing”, Proc. of the 2nd Inter. Conf. on Fatigue and Fatigue Thresholds, U.K, Sept.3-7, 1984.

[8] 高镇同，“疲劳应用统计学”，国防工业出版社，北京（1980年）。

[9] 航空工业部科学技术情报研究所，“先进复合材料设计手册”，1984年。

[10] 林富甲，“材料性能测试中试件数的确定”，固体力学学报，1985年6月第2期。

MAXIMUM ERROR LIMIT AND MINIMUM SPECIMEN NUMBER REQUIRED IN STRENGTH AND FATIGUE TESTING OF COMPOSITES

Yang Naibin

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

(Received May 4, 1985)

ABSTRACT

Large sample size is required in strength and fatigue testing of composite materials because of their big experimental data scatter. The variational coefficient, C_v, of CFRP, for instance, is 8 to 11 per cent for strength testing and 14—16% for fatigue. The experiment cost of these two properties may be very high if the reliable experimental results is required. In this paper the maximum error limit and the minimum specimen number required in strength and fatigue testing for composites are studied according to the characteristics of strength and fatigue experimental data scatters and the analytical solution of statistic theory as following

$$\frac{\delta_{max}}{t_r\sqrt{\frac{1}{n}+U_p^2(\beta^2-1)}-\delta_{max}U\cdot\beta}\geqslant C_v$$

where δ_{max} means maximum limit of error, C_v is conefficient of variation, n is the number of observed values, U_p is the standarad normal deviate corresponding to probability of survival p, and β is the correction factor of standard deviation. The value of t_r may be obtained from t-distribution table when confidence level r and $\gamma=n-1$ degree of freedom are given. Based on the experimental data, $\delta_{max}=10\%$ is suggested as the maximum error limit for strength and fatigue testing of composite. By means of the δ_{max} and United State Boeing Corporation standard A-Basis and B-Basis for allowable strength and fatigue properties of composites, the minimum specimen numbers in accordance with variation coefficient, C_v, can be calculated from the equation above mentioned and they are tabulated in Table 4 of this paper.