

复合材料 B 基准值统计的多环境样本合并方法

叶强^{1,*}, 金浩², 陈普会¹, 沈真²

(1. 南京航空航天大学 飞行器先进设计技术国防重点学科实验室, 南京 210016;

2. 江苏恒神股份有限公司, 镇江 212314)

摘要: 为缩减获得复合材料设计许用值的试验成本, 首先, 介绍了复合材料手册-17-G 最新推荐的一种基于回归分析的合并多环境样本的 B 基准值统计方法, 重点阐述了在批间变异检验、环境样本间的方差等同性检验及正态性检验中加入工程经验判断的合理性及适用条件; 然后, 根据该多环境样本合并方法, 设计开发了 B 基准值统计分析软件; 最后, 采用该软件对江苏恒神股份有限公司部分复合材料的力学性能数据进行了统计分析。结果表明: 与传统的单环境样本统计程序相比, 该多环境样本合并方法不仅显著提高了 B 基准值, 而且克服了传统统计程序中对样本数量及批次数的限制。所得结论表明该方法具有较高的可操作性, 适用于在缩减样本的情况下统计分析复合材料 B 基准值。

关键词: 复合材料; 力学性能数据; B 基准值; 多环境样本合并方法; 工程经验判断

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2016)05-1040-08

复合材料的特点是材料与结构同时形成, 因此原材料、成型工艺及检测操作的细微差异都会导致性能数据存在变异性, 而且这种变异性一般远大于金属材料的^[1-2]。为保证复合材料结构的安全性, 设计之前应对材料基本强度性能的试验数据进行统计分析, 并确定具有一定置信度和可靠度的性能表征值, 一般采用 B 基准值。B 基准值的定义为在 95% 的置信度下力学性能的限定值。90% 性能数值群的值高于此值^[3-5]。

复合材料性能数据的 B 基准值统计程序发展主要经历了 3 个阶段。1985 年美国的 MIL-HDBK-17-1F 军用手册^[6]首先给出了 B 基准值的计算方法及统计程序, 但该统计程序只针对单一环境下的试验数据。统计中将数据划分为 2 类: 结构型数据与非结构数据。统计结构型数据的 B 基准值时, 根据优先级须依次进行 3 种分布的拟合优度检验: 威布尔分布、正态分布及对数正态分布。若样本数据均未通过这 3 项检验, 则采用非参数方法计算 B 基准值。另外, MIL-HDBK-17-1F 军用手册^[6]推荐采用

ANOVA 方法统计非结构数据的 B 基准值。

为满足统计学上的可重复性要求, 该统计程序要求每种力学性能在每种试验环境下提供 30 个数据 (至少 5 批次, 每批次 6 个数据), 这无疑需要很高的试验成本。为此, 2003 年美国联邦航空管理局 (Federal Aviation Administration, FAA) 在原有的统计方法的基础上, 在 DOT/FAA/AR-03/19《聚合物基复合材料体系的材料取证与等同: 更新程序》^[7]中提出了一种基于回归分析的、合并多环境样本的 B 基准值统计程序。由于采用了多环境样本合并的统计方法, 该统计程序将每种试验环境下的样本大小要求缩减为 3 批次, 显著降低了试验成本。该合并方法的核心思想是通过合并样本获得具有特定破坏模式的所有环境条件试验结果共性统计量。为产生有效的 B 基准值, 该数据处理方法需要满足几个基本的假设: ① 各环境条件的批间变异性是相当的; ② 各环境条件的数据呈正态分布; ③ 不同试验环境条件下的变异性是等同的。在实际的数据统计应用中, 由于受每种环境条件的批次及环境条件数的限制,

收稿日期: 2015-10-27; 录用日期: 2015-11-12; 网络出版时间: 2016-01-20 13:37

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20160120.1337.004.html

基金项目: 国家自然科学基金(11302099); 中国博士后科学基金(2013M541658); 江苏省自然科学基金(BK20130784)

通讯作者: 叶强, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为复合材料结构设计。 E-mail: qye@nuaa.edu.cn

引用格式: 叶强, 金浩, 陈普会, 等. 复合材料 B 基准值统计的多环境样本合并方法[J]. 复合材料学报, 2016, 33(5): 1040-1047.

YE Q, JIN H, CHEN P H, et al. Multiple condition samples merging method for B-basis value statistics of composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(5): 1040-1047 (in Chinese).

往往很难通过这 3 点假设的诊断性检验, 若不加入一些经验判断, 放弃该合并统计方法而采用 MIL-HDBK-17-1F 军用手册^[6]推荐的方法, 将会使得统计结果比较保守。FAA 虽然允许在 B 基准值统计程序中加入一些经验判断方法, 但 DOT/FAA/AR-03/19^[7]中并未提及具体的方法。

随着复合材料数据统计研究的发展, 美国汽车工程师学会在最新推出的复合材料手册-17-G (Composite Material Handbook-17-G, CMH-17-G)^[8]中对 B 基准值统计方法及统计程序作了全面的更新, 其最大的特点是给出了批间变异性、方差等同性及正态分布检验的工程判断方法, 结合诊断性检验可用于断定多环境样本是否满足合并条件。

长期以来, 中国基本上都是按 MIL-HDBK-17-1F 军用手册^[6]中方法编制的程序完成试验数据的 B 基准值统计^[9-11], 并公布其材料许用值, 而关于合并多环境样本统计方法的研究较少^[12-15]。因此, 笔者根据 CMH-17-G^[8]推荐的最新 B 基准统计方法, 设计开发新的 B 基准值统计软件, 并对江苏恒神股份有限公司提供的复合材料性能数据进行统计分析。

1 基于回归分析的 B 基准值统计方法

1.1 统计流程

CMH-17-G 推荐使用的 B 基准值统计的一般流程^[8]如图 1 所示。

具体统计步骤如下:

- (1) 对所有受纤维控制的性能数据进行正则化处理, 以考虑试件的纤维体积分数的变化对性能的影响(参见 CMH-17-G^[8]第 2.4.3 节)。
- (2) 所合并的样本应包含 2 种或 2 种以上环境条件, 被合并的环境条件在试验温度范围内应是相邻的, 并且应包括室温干态的环境条件; 每种环境条件应至少包含 3 批次、总数不少于 15 且破坏模式一致的数据。
- (3) 采用 k -样本 Anderson-Daring (ADK) 检验方法评估每种环境样本的批间变异性。在 ADK 检验之前, 必须预先采用最大赋范残差 (Maximum Normed Residual, MNR) 方法对每批次材料进行数据异常检验; 对于离散系数过低的环境数据, 应将离散系数 CV 改为变换后的离散系数 CV^* :

$$CV^* = \begin{cases} 0.06 & CV < 0.04 \\ CV/2 + 0.04 & 0.04 \leq CV \leq 0.08 \\ CV & 0.08 < CV \end{cases} \quad (1)$$

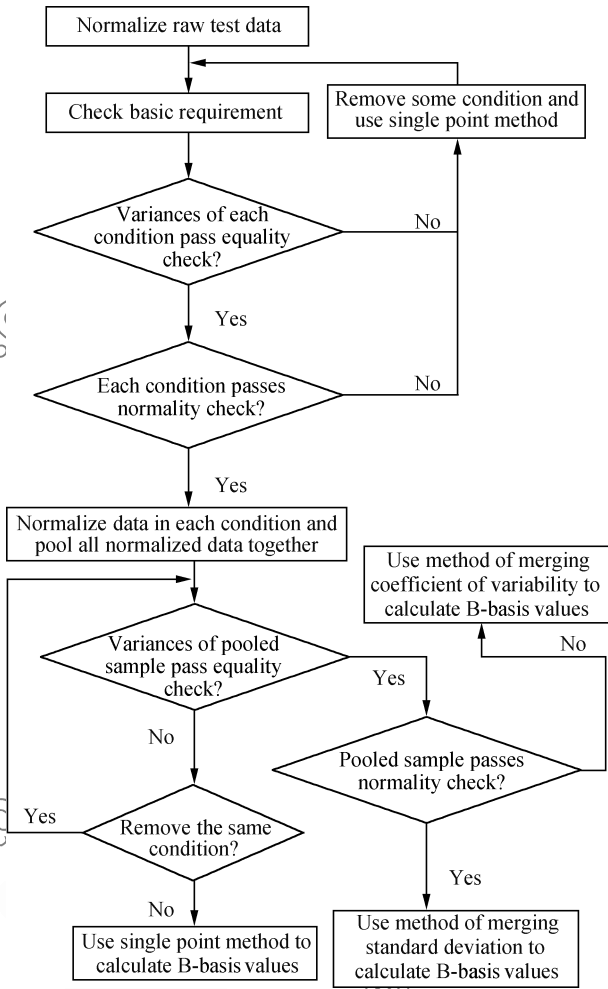


图 1 B 基准值统计的一般流程^[8]
Fig. 1 General statistical process of B-basis value^[8]

当未通过 ADK 检验时, 可采用批间变异性检验的工程经验方法作进一步的评估: ① 如果绝大部分数据处于各批次数据的重叠范围内, 则认为各批次数据可合并; ② 如果各批次数据的离散系数都很低 (低于 0.04), 而且合并后数据的离散系数同样较低, 那么可认为各批次数据来自于同一母体; ③ 各批次数据合并后, 如果离散系数小于试验方法的测量精度, 那么可认为各批次数据来自于同一母体; ④ 如果未通过 ADK 检验的环境样本离散系数与那些通过检验的环境样本相当, 那么可认为该环境样本的各批次数据来自于同一母体; ⑤ 如果存在某批次数据的均值始终高于或低于大部分环境样本均值的一种可辨认趋势, 则该环境样本各批次数据不可合并。

(4) 当 ADK 检验和工程经验方法均不能表明各批次数据来自于同一母体时, 则从合并样本中去除该环境样本, 可用传统的针对单环境样本的单元

法统计程序统计其 B 基准值。CMH-17-G^[8] 推荐的单点法统计程序与 MIL-HDBK-17-1F 军用手册^[6] 中的相比, 优先考虑的是正态分布模型而非威布尔分布模型, 除此之外无其他本质区别。反之, 则合并该环境的各批次数据, 并对其合并数据集进行异常数据检验和正态性检验。检验时, 首先采用显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的 Anderson Darling 检验方法进行正态分布的优度检验, 如果未通过, 则可采用基于正态分布曲线图或正态分数图的图解法作进一步的正态性检查。

(5) 如果 Anderson Darling 检验方法和基于图解法的检查均未通过, 则从合并样本中去除该环境样本, 其 B 基准值只能用传统的单点法统计程序中的其他分布模型进行统计; 反之, 则对剩余的所有环境样本进行归一化处理(每种环境样本数据除以各自的均值), 形成汇集样本。

(6) 使用 Levene 检验方法检验各种环境的归一化后数据在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下的方差等同性。若未通过该诊断性检验, 可采取工程经验方法作进一步的判断: ① 可采用其他显著性水平($\alpha = 0.025, 0.010$)下的方差等同性检验; ② 虽然未通过, 但是各组数据的离散系数均处于某种合理的水平并且相互之间的差别在百分之几以内, 则从工程经验上可认为方差是等同的; ③ 如果存在某种环境条件, 其力学性能数据对环境影响比较敏感, 且离散系数一直保持在很高或很低水平, 则应从汇集样本中去除该环境, 剩余汇集样本应重新进行方差等同性检验。

(7) 如果诊断性检验及工程经验判断都无法断定汇集样本的方差是等同的, 那么所有样本只能采用单点法程序统计 B 基准值。如果通过了方差等同性检验, 可进一步对汇集样本作正态性检验, 检验方法与步骤(5)一致。如果通过了正态性检验, 可采用合并离散系数法计算 B 基准值; 如果未通过, 则采用合并标准差法计算。

1.2 合并离散系数法

合并离散系数法的计算过程可分为 3 个步骤完成。

(1) 计算每种环境条件的容限系数

第 j 个环境样本的 B 基准容限系数 $(k_B)_j$ 可用非中心 t 分布的第 95 百分位点 $t_{0.95}$ 表示:

$$(k_B)_j = \frac{t_{0.95}(z_B \sqrt{n_j}, N-r)}{\sqrt{n_j}} \quad (2)$$

式中: z_B 为概率等于 90% 的标准正态随机变量值; n_j 为第 j 个环境条件的数据数; N 为整个汇集样本的数据点总数; r 为被合并的环境数目。

(2) 计算每种环境条件的换算系数

每种环境条件的 B 基准值换算系数 B_j 为

$$B_j = 1 - (k_B)_j s \quad (3)$$

式中: s 为归一化合并数据组的标准差, $s = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - 1)^2 / (N-r)}$, 其中 x_i 为合并数据组中第 i 个数据点, n 为合并数据组的数据数。

(3) 计算每种环境条件的 B 基准值

将式(3)的换算系数乘以每种环境的实际样本均值, 即可算出 B 基准值:

$$(B_{\text{basis}})_j = \bar{x}_j B_j \quad (4)$$

式中: $\bar{x}_j$ 为第 j 个环境样本的均值。

1.3 合并标准差法

合并标准差法的每种环境条件的 B 基准值为

$$(B_{\text{basis}})_j = \bar{x}_j - (k_B)_j s_p \quad (5)$$

式中: s_p 为归一化前合并数据组的标准差, $s_p = \sqrt{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 / (N-r)}$, 其中 x_{ij} 为第 j 个环境样本的第 i 个数据。

2 性能统计数据

统计分析选取的不同系列层合板的试验数据如表 1 所示, 为由江苏恒神股份有限公司的某 3 个系列预浸料制备的经过正则化处理后的层合板力学性能数据。

3 结果与讨论

3.1 系列 1 层合板

表 2 为系列 1 层合板试验数据的诊断性检验结果。检验之前, 23 °C 干态的环境样本的离散系数过低, 必须按照式(1)的规则进行变换处理。表 2 还给出了未作离散系数变换处理下的检验情况。经过变换, 使得 23 °C 干态的环境样本与其他样本的离散系数相当, 从而通过了方差等同性检验, 也通过了汇集样本的正态性检验。71 °C 干态的环境样本虽然未通过正态性的诊断性检验, 但通过了基于图解法(见图 2 系列 1 层合板的正态分布曲线及表 2 中的 Pearson 系数)的经验方法检验, 可断定该样本接受正态性分布的假设。

表 1 不同系列层合板的试验数据

Table 1 Test data for laminates of different series

Temperature/ ℃	Condition	Batch	Longitudinal compression strength data of Series 1 laminates/MPa	Transverse tensile strength data of Series 2 laminates/MPa	Longitudinal tensile strength data of Series 3 laminates/MPa
-55	Dry	1		608, 646, 690, 674, 706, 705	1 449, 1 833, 1 692, 1 821, 1 521, 1 836
		2		547, 618, 609, 589, 658, 668	1 841, 1 512, 1 677, 1 370, 1 509, 1 371
		3		551, 570, 559, 447, 568	1 984, 1 965, 1 590, 1 790, 1 810, 1 308
23	Dry	1	1 232, 1 430, 1 343, 1 367, 1 305	772, 726, 749, 801, 749, 750	1 868, 1 910, 2 070, 1 789, 1 955, 1 970
		2	1 369, 1 305, 1 254, 1 246, 1 364, 1 398	751, 726, 743, 774, 777, 769	1 629, 1 690, 1 529, 1 806, 2 029, 1 909
		3	1 344, 1 290, 1 317, 1 409, 1 310, 1 366	740, 723, 715, 773, 713, 774	2 003, 2 035, 1 855, 2 085, 1 943, 1 999
		4			1 849, 1 842, 1 623, 2 075, 2 061, 1 924
		5			1 556, 1 684, 1 696, 1 748, 1 706, 1 580
71	Dry	1	1 020, 1 078, 1 017, 1 042, 909, 1 001	828, 880, 800, 571, 688, 698	1 900, 1 821, 2 003, 1 795, 1 881, 1 910
		2	991, 939, 736, 910, 984, 1 063	823, 883, 892, 829, 701, 815	1 788, 1 886, 1 837, 1 954, 1 581, 1 749
		3	883, 1 010, 1 039, 930, 1 048, 995	796, 829, 809, 808, 706, 751	1 760, 1 970, 1 989, 1 915, 2 002, 1 956
120	Wet	1	1 107, 1 007, 1 086, 939, 876, 840	787, 807, 745, 737, 758, 790	1 513, 1 592, 1 637, 1 520, 1 400, 1 306
		2	774, 779, 758, 947, 1 013, 736	776, 818, 724, 765, 759, 703	1 310, 1 437, 1 414, 1 618, 1 348, 1 578
		3	983, 1 058, 967, 958, 964, 924	813, 593, 759, 764, 810, 671	1 670, 1 752, 1 744, 1 562, 1 678, 1 645

Notes: Series 1 — A certain kind of unidirectional prepreg; Series 2 — A certain kind of fabric; Series 3 — Another certain kind of unidirectional prepreg.

表 2 系列 1 层合板试验数据的诊断性检验结果

Table 2 Diagnostic check results for test data of Series 1 laminates

Temperature/ ℃	Condition	Transformation	ADK check			Normality check			Levene check			
			A_{ca}	A_{cr}	Result	OSL	Pearson coefficient	Result	CV/%	F_{cr}	F_{ca}	Result
23	Dry	With	0.367	1.910	Pass	0.623	0.987	Pass	7.0			
		Without	0.595	1.910	Pass	0.546	0.987	Pass	4.1			
71	Dry	With	0.886	1.917	Pass	0.048	0.930	Failed	8.4			
120	Wet	With	1.924	1.917	Failed	0.262	0.977	Pass	12.2			
Pooled sample		With				0.154	0.987	Pass		3.183	2.037	Pass
		Without				0.016	0.976	Failed			4.704	Failed

Notes: A_{ca} — Calculated value of ADK check; A_{cr} — Critical value of ADK check; OSL — Observed significance level; F_{cr} — Calculated value for equality of variances check; F_{ca} — Critical value for equality of variances check.

采用合并离散系数法算出的系列 1 层合板的 B 基准值如表 3 所示。可知, 离散系数的变换处理使 B 基准值的计算结果变得更加保守。

3.2 系列 2 层合板

表 4 为系列 2 层合板试验数据的诊断性检验结果。图 3 为系列 2 层合板的 -55 ℃ 干态批次的数据。

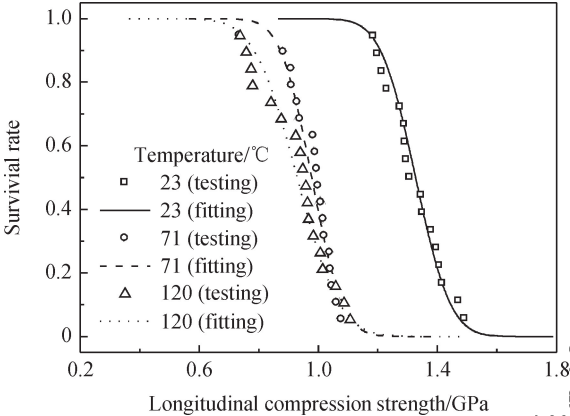


图2 系列1层合板的正态分布曲线

Fig.2 Normal distribution curves of Series 1 laminates

可见，-55 °C干态的环境样本未通过 ADK 检验；但由图 3 可知，大部分数据位于正负标准差线的区间内，即符合批间变异性检验的工程经验方法的第①条准则（见第 1.1 节）；另外，其离散系数与通过检验的71 °C干态环境样本的相当，即满足工程经验方法的第④条准则（见第 1.1 节），因此可认为各批次数据来自于同一母体。正态性检验中，71 °C干态、120 °C湿态及汇集样本虽然都未通过正态性检验，但通过了基于图解法（见图 4 系列 2 层合板的正态分布曲线及表 4 中的 Pearson 系数）的经验方法检验，可断定该样本接受正态性假设。

采用合并方法及单点法算出系列 2 层合板的 B 基准值，如表 5 所示。与合并离散系数法相比，合

表 3 系列 1 层合板的 B 基准值

Table 3 B-basis values of Series 1 laminates

Temperature/°C	Condition	Transformation	Average of longitudinal compression strength/MPa	Standard deviation	k_B	B-basis value
23	Dry	With	1 327	92.4	1.688	1 115
		Without		54.9		1 127
71	Dry	With	978	82.5	1.676	822
		Without				831
120	Wet	With	929	112.8	1.676	781
		Without				790

Note: k_B — B-basis tolerance factor.

表 4 系列 2 层合板试验数据的诊断性检验结果

Table 4 Diagnostic check results for test data of Series 2 laminates

Temperature/°C	Condition	ADK check			Normality check			Levene check			
		A_{cn}	A_{cr}	Result	OSL	Pearson coefficient	Result	χ^2	F_{cr}	F_{ca}	Result
-55	Dry	3.449	1.917	Failed	0.435	0.972	Pass	11.3			
23	Dry	0.476	1.917	Pass	0.170	0.974	Pass	6.9			
71	Dry	1.638	1.917	Pass	0.015	0.939	Failed	10.3			
120	Wet	0.623	1.917	Pass	0.042	0.930	Failed	7.4			
Pooled sample					0.040	0.976	Failed		2.742	1.421	Pass

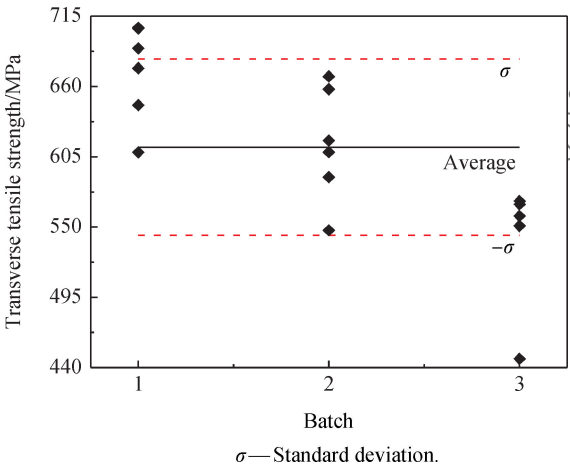


图3 系列2层合板的-55 °C干态批次的的数据

Fig.3 Batch-data of Series 2 laminates at -55 °C in dry state

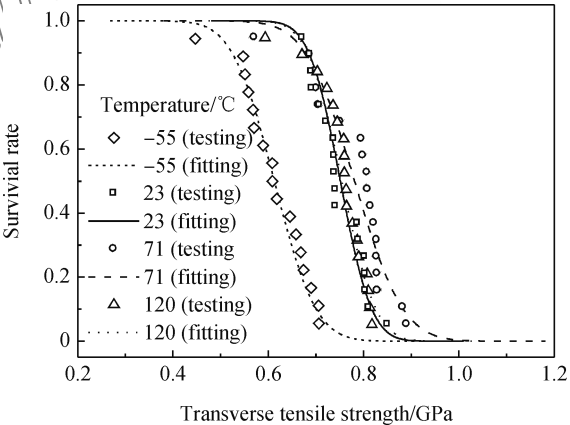


图4 系列2层合板的正态分布曲线

Fig.4 Normal distribution curves of Series 2 laminates

表 5 系列 2 层合板的 B 基准值

Table 5 B-basis values of Series 2 laminates

Temperature/ ℃	Condition	Average of transverse tensile strength/MPa	Standard deviation	k_B	B-basis value			Retention rate/%			Distribution
					Merging standard deviation	Merging CV	Single point	Merging standard deviation	Merging CV	Single point	
−55	Dry	613	69.0	1.686	518	502	258	84.5	81.9	42.0	ANOVA
23	Dry	751	51.7	1.674	637	642	648	84.8	85.5	86.3	Normal
71	Dry	781	80.1	1.674	662	672	623	84.7	86.0	79.6	Weibull
120	Wet	754	56.0	1.674	639	645	649	84.7	85.6	86.1	Normal

Note: Retention rate is B-basis value divide average of transverse tensile strength.

并标准差法计算出的 B 基准值保持率随着均值的变化略微有所波动; 单点法计算出的 B 基准值随着分布形式的不同变化较大; 正态分布模型所得的 B 基准值较大, 与合并方法相当; 其他分布模型所得到的 B 基准值比较保守。

3.3 系列 3 层合板

系列 3 层合板试验数据的诊断性检验结果如表 6 所示。可见, 23 ℃干态和 120 ℃湿态环境样本未通过 ADK 检验, 但是其离散系数位于通过检验的 71 ℃干态和 −55 ℃干态的环境样本之间, 与之相当, 即满足批间变异性检验的工程经验方法的

第④条准则(见第 1.1 节), 因此可认为各批次数据来自于同一母体。正态性检验中, 汇集样本虽然都未通过正态性检验, 但是可通过图解法断定该样本接受正态性假设。方差等同性检验中, 虽未通过诊断性检验, 但是当 $\alpha=0.025$ 时, $F_{cr}=3.282>F_{ca}$, 因此可断定各环境样本的方差是等同的。

当 23 ℃干态样本分别取 5 批次、4 批次(第 1、2、4、5 批)和 3 批次(第 1、3、5 批)数据时, 采用合并离散系数方法所得的系列 3 层合板的 B 基准值如表 7 所示。可知, 批次的选取对其他环境条件下 B 基准值的计算结果影响较小。

表 6 系列 3 层合板试验数据的诊断性检验结果

Table 6 Diagnostic check results for test data of Series 3 laminates

Temperature/℃	Condition	ADK check			Normality check			Levene check			
		A_{ca}	A_c	Result	OSL	Pearson coefficient	Result	CV/%	F_{cr}	F_{ca}	Result
−55	Dry	1.083	1.917	Pass	0.179	0.973	Pass	12.8			
23	Dry	2.100	1.641	Failed	0.194	0.977	Pass	9.2			
71	Dry	1.126	1.917	Pass	0.493	0.981	Pass	7.5			
120	Wet	2.855	1.917	Failed	0.409	0.982	Pass	8.9			
Pooled sample					0.028	0.987	Failed		2.720	3.233	Failed

表 7 系列 3 层合板的 B 基准值

Table 7 B-basis values of Series 3 laminates

Temperature/ ℃	Condition	Number of batches	Average of longitudinal tensile strength/MPa	Standard deviation	k_B	B-basis value
−55	Dry	5			1.670	1 391
		4	1 660	212.0	1.674	1 389
		3			1.670	1 392
23	Dry	5	1 847	170.0	1.585	1 564
		4	1 812	170.0	1.621	1 525
		3	1 859	166.0	1.674	1 556
71	Dry	5			1.673	1 568
		4	1 872	139.7	1.674	1 566
		3			1.674	1 568
120	Wet	5			1.670	1 293
		4	1 543	137.5	1.674	1 291
		3			1.670	1 292

4 结 论

(1) 采用最新的基于回归分析的多环境样本合并方法,对某3个系列层合板的力学性能数据进行了B基准值统计分析。经离散系数变换处理,使得变换后的环境样本与其他样本的数据分散性相当,提高了通过正态性及方差等同性的诊断性检验的机率,并且使B基准值的统计结果变得相对保守。

(2) 提出的关于批间变异性检验、环境样本间的方差等同性检验及正态性检验的经验判断方法具有较高的可操作性。

(3) 与传统的单环境统计方法相比,多环境样本合并方法统计的B基准值一般比较高,且该方法对批次数的影响不敏感。

参考文献:

- [1] 马立敏,张嘉振,程小全,等. 复合材料在新一代大型民用飞机中的应用[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 317-322.
MA L M, ZHANG J Z, YUE G Q, et al. Application of composites in new generation of large civil aircraft[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 317-322 (in Chinese).
- [2] 李辉,张立同,曾庆丰,等. 2D C/SiC复合材料的可靠性评价[J]. 复合材料学报, 2007, 25(4): 95-100.
LI H, ZHANG L T, ZENG Q F, et al. Reliability analysis of 2D C/SiC composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 25(4): 95-100 (in Chinese).
- [3] 牛春匀. 实用飞机复合材料结构设计与制造[M]. 程小全,张纪奎,译. 北京:航空工业出版社, 2010: 322-325.
NIU M C Y. Composite airframe structures[M]. CHENG X Q, ZHANG J K, translated. Beijing: Aviation Industry Press, 2010: 322-325 (in Chinese).
- [4] 杨旭,何为,韩涛,等. 低速冲击下复合材料层板压缩需用值[J]. 复合材料学报, 2014, 31(6): 1626-1634.
YANG X, HE W, HAN T, et al. Compressive allowable of composite laminate subjected to low velocity impact[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(6): 1626-1634 (in Chinese).
- [5] 中国航空研究院. 复合材料结构设计手册[M]. 北京:航空工业出版社, 2001: 36-39.
China Aviation Academy. Composite structure design manual [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001: 36-39 (in Chinese).
- [6] Federal Aviation Administration. Composite materials handbook—Volume 1. Polymer matrix composites; Guidelines for characterization of structural materials; MIL-HDBK-17-1F[S]. Washington, D.C.: Federal Aviation Administration, 2002.
- [7] TOMBLIN J S, NG Y C, RAJU K S. Material qualification

- and equivalency for polymer matrix composite material systems; Updated procedure; DOT/FAA/AR-03/19 [R]. Washington, D.C.: Federal Aviation Administration, 2003.
- [8] Society of Automotive Engineers International. Composite materials handbook—Volume 1: Polymer matrix composites; Guidelines for characterization of structural materials; CMH-17-G[S]. Warrendale: SAE International, 2012.
- [9] 王亮,王海鹏,吴安民. 复合材料破坏数据B基准值计算的程序设计[J]. 理化检验-物理分册, 2010, 46(7): 443-444.
WANG L, WANG H P, WU A M. Programming of composites damaged test data for B-basis value calculation[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2010, 46(7): 443-444 (in Chinese).
- [10] 杜宝江,季长芹,郭京敏,等. 航空用某复合材料力学特性统计分布的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2012, 35(3): 30-33.
DU B J, JI C Q, GUO J M, et al. Statistical distribution of mechanical properties for one aeronautical composite material [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2012, 35(3): 30-33 (in Chinese).
- [11] 马鑫,关志东,薛斌,等. 复合材料B基准值计算程序[J]. 制造业自动化, 2011, 33(10): 83-87.
MA X, GUAN Z D, XUE B, et al. Programming of B-basis value calculation of composites[J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(10): 83-87 (in Chinese).
- [12] 孙坚石,叶强. 复合材料力学性能数据B基准值计算程序[J]. 航空制造技术, 2009(增刊1): 19-24.
SUN J S, YE Q. Brief introduction of calculation procedure for B-base value of composite mechanical property data[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009 (Suppl. 1): 19-24 (in Chinese).
- [13] 王翔,陈新义,王海鹏,等. 基于统计的复合材料B基准值计算方法研究[J]. 失效分析与预防, 2010, 5(4): 210-215.
WANG X, CHEN X W, WANG H P, et al. Statistic-based calculation methods of B-basis value of composites[J]. Failure Analysis and Prevention, 2010, 5(4): 210-215 (in Chinese).
- [14] 中国航空工业总公司. 聚合物基复合材料力学性能数据表达准则: HB 7618—2009[S]. 北京:中国航空工业总公司, 2009.
Aviation Industry Corporation of China. Data expression criteria for mechanical properties of polymer matrix composite; HB 7618—2009[S]. Beijing: Aviation Industry Corporation of China, 2009 (in Chinese).
- [15] 董本正,李伟,高丽红,等. 基于Matlab的碳纤维复合材料的B基准值算法[J]. 现代电子技术, 2014, 37(16): 87-91.
DONG B Z, LI W, GAO L H, et al. Matlab based algorithm for B reference value of carbon fiber reinforced polymer[J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(16): 87-91 (in Chinese).

Multiple condition samples merging method for B-basis value statistics of composites

YE Qiang^{1, *}, JIN Hao², CHEN Puhui¹, SHEN Zhen²

(1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense—Advanced Design Technology of Flight Vehicle, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Jiangsu Hengshen Company Limited, Zhenjiang 212314, China)

Abstract: In order to reduce the test cost for obtaining the design allowables of composites, a regression analysis-based B-basis value statistical method merging multiple condition samples which was latest issued by Composite Material Handbook-17-G was introduced, and the rationality and applicable conditions for the addition of engineering experience judgment in the check of variation between batches, the equality check for square deviation between condition samples and the normality check were expounded emphatically. Then, the software for statistical analysis of B-basis value was developed based on the merging method of multiple condition samples. Finally, the software was used to statistically analyze the mechanical properties data of partial Jiangsu Hengshen Company Limited composites. The results show that comparing with the traditional single condition sample statistic program, the multiple condition samples merging method not only raises the B-basis value significantly, but also overcomes the limitation for number of samples and number of batches in traditional statistic program. The conclusions obtained show that this method has higher operability, and is applicable to the statistical analyses for B-basis values of composites in the case of reduced sample.

Keywords: composites; mechanical properties data; B-basis value; multiple condition samples merging method; engineering experience judgment