

国产T800级碳纤维复丝性能的B基准值计算与对比分析

张 驰¹ 闫源江² 廖英强¹

(1 西安航天复合材研究所, 西安 710025)

(2 海军装备部, 西安 710054)

文 摘 针对复丝性能存在差异性和离散性较大的问题,本文开展了碳纤维复丝的拉伸强度、拉伸模量及断裂延伸率等基础性能测试,并采用单一环境下B基准值的推荐统计方法,对来自三家厂商的复丝性能数据进行了系统分析与评估,旨在全面表征其力学性能,为材料选型提供可靠依据。分析结果表明,三家厂商复丝的拉伸性能数据整体呈正态分布,符合统计分析的基本假设。基于B基准值计算的统计结果显示,不同厂商复丝在性能参数上存在一定差异,但均处于工程可接受范围内,具有良好的应用可靠性。B基准值作为材料性能下界的保守估计方法,能有效反映复丝性能特征,可为复合材料的选材与应用提供工程上明确的参考依据。

关键词 B基准,复丝强度,国产T800级,正态分布

中图分类号:TB331

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.S1.018

Calculation and Comparative Analysis of the B-basis Values for T800 Grade Carbon Fiber Filament

ZHANG Chi¹ YAN Yuanjiang² LIAO Yingqiang¹

(1 Xi'an Aerospace Composites Research Institute, Xi'an 710025)

(2 PLA Navy Equipment Department, Xi'an 710054)

Abstract As the fundamental building block of composite materials, the mechanical properties of carbon fiber tows play a critical role in material design and engineering applications. To address the issues of variability and dispersion in tow performance, this study conducted fundamental mechanical tests, including tensile strength, tensile modulus, and elongation at break. The test data from three different manufacturers were systematically analyzed using the recommended statistical method of single-environment B-basis values, aiming to comprehensively evaluate the mechanical properties of carbon fiber tows and provide a reliable basis for material selection. The analysis showed that the tensile properties of the tows from all three manufacturers followed a normal distribution, meeting the basic assumptions of statistical analysis. The B-basis statistical results indicated some differences in performance parameters among manufacturers, yet all fell within acceptable engineering ranges, demonstrating adequate application reliability. As a conservative estimate of the lower bound of material properties, the B-basis value effectively reflects the performance characteristics of carbon fiber tows and offers an engineering-relevant reference for the selection and application of composite materials.

Key words B-basis values, Carbon fiber filament, T800 grade, Normal distribution

0 引言

随着复合材料性能及其加工工艺的持续优化,其在航空航天主承力结构中的规模化应用对结构设计提出了更严苛的可靠性要求。设计人员亟需获取更为精确且可靠的复合材料性能数据,以应对其应用范围的

不断扩大。与金属材料不同,复合材料的性能易受原材料差异、制造工艺波动及检验环境变化等多尺度耦合因素的影响,从而导致其性能呈现出显著的变异性。因此,为确保复合材料结构的安全性,在设计过程中必须采用经过统计处理的材料性能数据。研究人员结合

收稿日期:2025-05-12

第一作者简介:张驰,1989年出生,博士,主要从事复合材料成型工艺及性能表征工作。E-mail:zhang007chi@126.com

材料学与统计学的相关理论提出了采用B基准值这一统计量来描述对材料性能最小预期的概念,即B基准值的定义为:是在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。B基准值可用来评判复合材料各种力学性能,是复合材料标准化过程中最关键的参数^[1-3]。

复合材料设计许用值的研究始于20世纪60年代,洛克希德公司首次从统计角度系统分析了用于航空结构(如垂尾和副翼)的Kevlar纤维、T300碳纤维及Style 181玻璃纤维复丝的力学性能数据,并提出了基准值的计算方法^[4]。20世纪70年代至今,美国军方在复合材料标准化方面取得了重要进展,陆续发布并更新了《美国军用手册》第17分册的多个版本(MIL-HDBK-17A至17F)^[5-7]以及Composite Materials Handbook(CMH-17G)手册^[8]。这些研究系统地建立了复合材料性能评估体系,并规范完善了单一环境和多环境样本数据的诊断性合并统计分析方法,为复合材料的性能表征体系奠定了理论和实践基础。ROSARIO等^[9]进一步探讨了现行手册中计算许用值的保守性问题,系统研究了样本量、变异系数与容许值保守性之间的关系,并提出一种量化非保守性概率计算方法,此方法可对许用值的可靠性进行了评估。随着B计算方法的不断完善,研究者逐渐将其应用于非标准试验件的特性表征。例如,VALLMAJO等^[10]基于无缺口层合板试样件的弹性模量、强度及统计分布曲线,构建了一套解析模型和不确定性分析方法,系统研究了开孔复合材料层合板的B基准许用值。CÓZAR等^[11]使用Monte Carlo近似模型分析了复合材料层合板受冲击后压缩强度的分布情况,并根据CMH-17G的方法计算了复合材料层合板受冲击后的B基准值并与有限元仿真结果进行了对比。国内研究人员在复合材料许用值的确定方面也进行了大量的跟踪性研究。文献^[12]基于MIL-HDBK-17B推荐的统计方法和统计分布类型,对其进行了比较,提出行业标准《聚合物基复合材料力学性能数据表达准则》,该标准首次给出了适用于国内要求的B基准计算方法。孙坚石等^[13]对比了MIL-HDBK-17与其他统计方法的异同,研究结果表明,采用回归统计法计算的结果普遍高于使用正态分布和Weibull分布统计方法所得到的结果。叶强和金浩等^[14]研究了基于CMH-17G手册的多环境样本合并方法,并开发了一款专门用于多环境样本合并计算的B基准值计算软件。为验证该计算流程的合理性,研究团队使用江苏恒神公司生产的预浸料制备了多组试样,并进行了实验验证。毛建晖等^[15]以拉挤板产品的测试数据为依据,研究了风电叶片复合

材料许用值的计算方法,对比了使用风电行业标准GL2010、标准DNVGL-ST-0376和CMH-17G中Weibull分布计算后结果的异同,发现在样本容量较小时Weibull分布计算较为保守,而当样本容量较大时,GL210计算结果较为保守。

综上所述,目前文献中的B基准值计算研究,按照MIL-HDBK-17及AC20-107B推荐的材料到结构金字塔形的试验评价体系分类^[16-18],主要集中在次层即元件级测试(如单向板、层合板等试样测试)这一层级,关于基础层即材料级测试(如碳纤维复丝)的B基准值研究较少,可参考数据较为有限。本文基于大量试验测试结果,根据CMH-17G推荐的单点计算方法,使用自编计算程序对三家公司的国产T800S-12K复丝性能试验数据的B基准值进行计算和对比研究。

1 试样制备与测试数据分析流程

1.1 测试方法

力学表征试样采用碳纤维复丝浸渍环氧树脂胶液制备,并在特定温度下固化至少30 min,固化后的复丝树脂含量控制在35%~50%。样品及夹持工装的设计和尺寸参照GB/T 3362—2017的推荐设计^[19],并在试样两端粘贴厚度为1.5 mm的金属加强片(图1)。

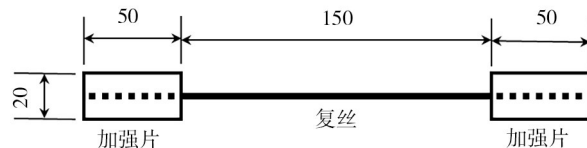


图1 试样形状及尺寸大小示意图

Fig. 1 Schematic diagram of specimen shape and dimensions

拉伸性能测试在INSTRON±500 kN电子万能试验机上进行,测试前,将试样准确安装于试验机夹头中,确保复丝轴向与加载方向保持一致。首先施加初始载荷(设定为预估破坏载荷的5%),随后对试样及应变测量装置进行校准和调整。在正式测试阶段,以恒定速率为5 mm/min持续施加拉伸载荷,直至试样发生断裂。实验过程中实时记录试样的最大载荷值及断裂模式等关键力表征参数。拉伸强度,拉伸模量和断裂延伸率的表征计算方法按照GB/T 3362—2017的推荐方法进行计算。

1.2 试验数据分析流程

单环境样本下试验数据的基准值分析流程遵循明确的计算流程如图2所示,大致可总结为三个计算步骤。

(1)结合工程经验,对数据合理性进行有效地判断,并对异常数据进行处理;根据CMH-17G手册的

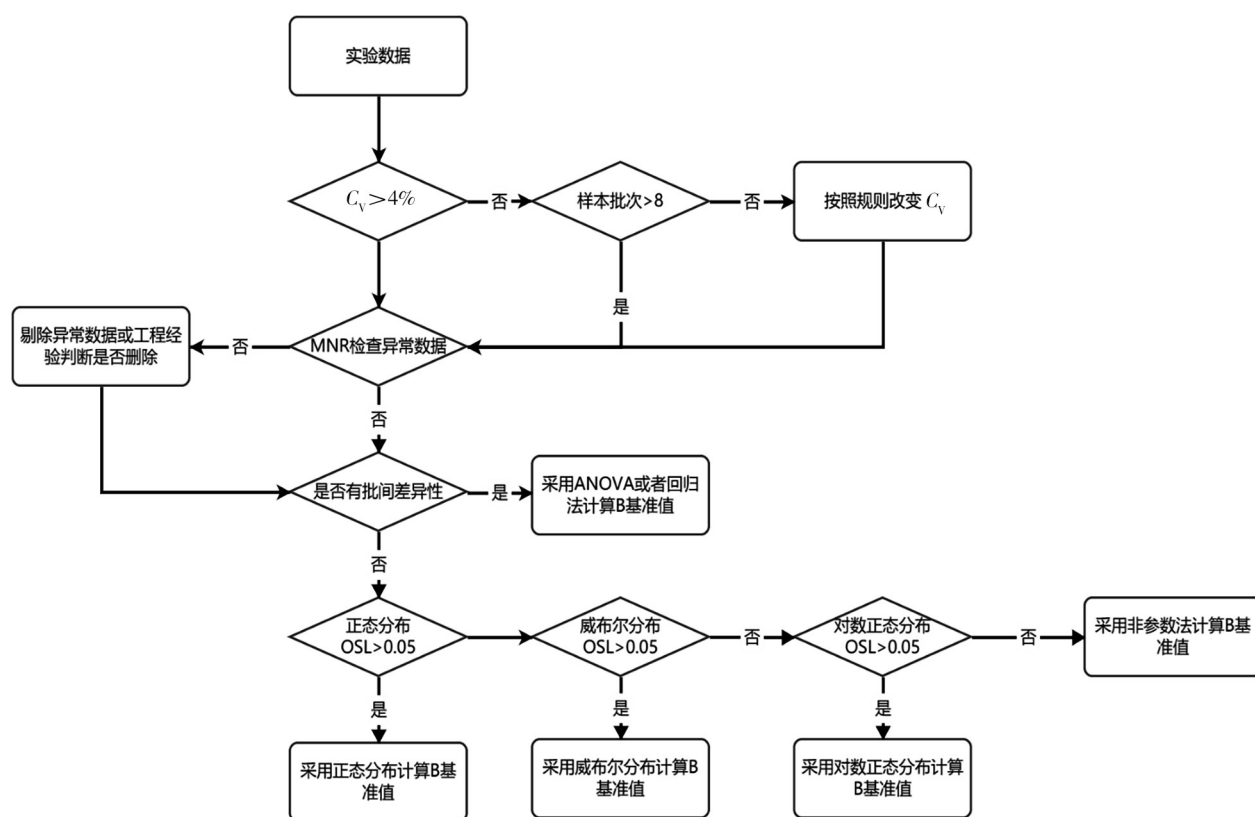


图2 B基准计算流程图

Fig. 2 Flow chart of B-basis calculation

要求,异常数据可通过计算统计样本中最大赋范残差统计量这一参数(MNR)来识别。MNR方法迭代一次可检测出一组数据的异常数据点,需通过迭代过程逐步完成对所有统计数据的全面检验。MNR统计量计算式如下:

$$MNR = \frac{\max |x_i - \bar{x}|}{s} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中, $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为样本中的 n 个观测值, $\bar{x}$ 和 s 分别为样本的均值和标准差。

临界值如下:

$$C = \frac{n-1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{t_\alpha^2}{n-2+t_\alpha^2}} \quad (2)$$

式中, t_α 值可在自由度为 $n-2$ 的 t 分布分位数计算表中查得。

(2)通过非参数统计检验方法,比较不同样本集合是否具有相同的分布特征,并对具有相同分布特征的集合加以合并; K 样本 Anderson-Darling 检验 (K -sample Anderson-Darling test) 是一种统计检验方法,旨在评估多个独立样本之间分布特征的等价性,检验不同样本集合是否具有相同的分布特征。该检验基于传统的双样本 Anderson-Darling 检验框架,能够同时对多个样本 ($K \geq 2$) 的经验分布函数进行比较分析,从而有效检测 K 个独立样本之间潜在的分布异质性。该方法通过计算表征批间变异性的 ADK 统

计量,并与临界值 ADC (由样本容量 n 和批次数 k 决定) 进行比较来判定数据同源性 ($ADK < ADC$ 时接受同源假设)。 K 样本 Anderson-Darling 检验统计量的具体计算公式和方法可参考文献 [20]。根据 CMH-17G 手册推荐,若检测出批间变异性,可按以下顺序进行对试验数据进行处理: 1) 获得更多批次的的数据; 2) 采用 ANOVA 法进行计算; 3) 分别计算每批的基准值,并选用最低值作为初步的基准值; 4) 根据工程经验决定接受或者忽略统计意义上的批间变异性。

(3)使用分布计算显著水平 (OSL) 这一指标来确定数据是否符合正态分布以及是否存在明显的偏态或峰态情况,并根据相应分布计算基准值。根据 CMH-17 规范,在计算基准值之前,必须对样本数据进行拟合优度检验 (Goodness-of-Fit Test), 以评估样本数据与特定理论分布之间的吻合程度。其中,观测显著性水平 (OSL) 作为分布形态检验的关键指标,用于量化样本数据与理论分布的偏离程度。当 OSL 值 ≤ 0.05 时,可在显著性水平为 5% 的条件下拒绝原假设,表明样本所来源的总体分布与理论分布存在显著差异,即总体不符合该分布形态。这一检验过程为后续 B 基准值计算的可靠性提供了重要依据。CMH-17 基于工程实践与理论研究的综合分析,推荐将正态分布作为复合材料力学性能数据分析的首选分布模型。当样本通过正态分布检验满足总体服从

正态分布的假设,则正态分布下的B基准值可由下式给出。

B = X̄ - k_b s (3)

式中,k_b为正态分布置信度为0.95时的单侧容限系数,其近似表达式如下:

k_b ≈ 1.282 + exp[0.985 - 0.52 ln(n) + 3.19/n](4)

2 测试结果统计分析

2.1 测试结果数据特征及异常数据识别

CMH-17G手册规定,采用单点法计算B基准值的样本容量要求是每种样本至少需要3个批次,每个批次至少包含6个数据。本研究测试了国内三个碳纤维制造厂家提供的T800级碳纤维复丝在单一环境条件下(室温干态)的拉伸强度、拉伸模量和断裂延伸率三个性能指标。为确保B基准值计算的准确性和可靠性,每个厂家每项测试的样本分3个批次进行测试,每个批次内的有效样本为10个,每个测试的样本总量为30个,显著超过手册中规定的最小样本数量(18个)。复丝拉伸强度的测试结果见表1,拉伸模量的测试结果见表2,断裂延伸率的测试结果见表3。

表1 拉伸强度测试结果数据特征

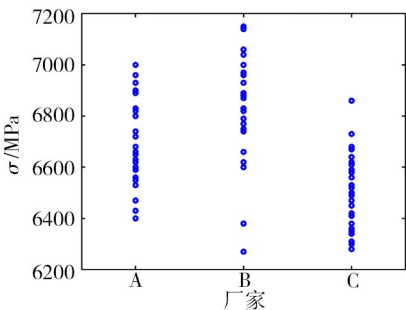
Table with 9 columns: Manufacturer, Batch, Mean Tensile Strength, Standard Deviation, Max Tensile Strength, Min Tensile Strength, Coefficient of Variation, MNR, Critical Value, and Abnormality. It contains data for three manufacturers (A, B, C) across three batches each.

表2 拉伸模量测试结果数据特征

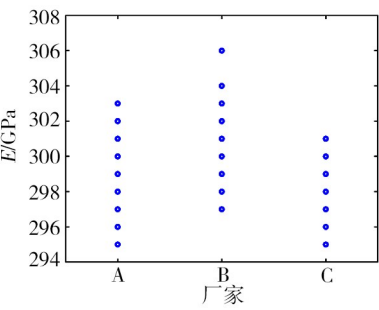
Table with 9 columns: Manufacturer, Batch, Mean Tensile Modulus, Standard Deviation, Max Tensile Modulus, Min Tensile Modulus, Coefficient of Variation, MN, Critical Value, and Abnormality. It contains data for three manufacturers (A, B, C) across three batches each.

表3 断裂延伸率测试结果数据特征

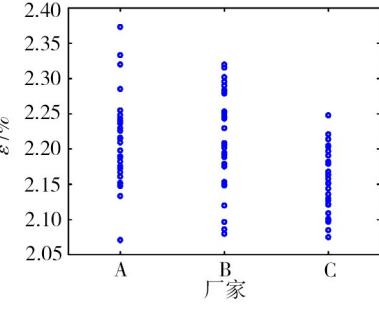
Table with 9 columns: Manufacturer, Batch, Mean Elongation at Break, Standard Deviation, Max Elongation at Break, Min Elongation at Break, Coefficient of Variation, MNR, Critical Value, and Abnormality. It contains data for three manufacturers (A, B, C) across three batches each.



(a) 复丝拉伸强度



(b) 复丝拉伸模量



(c) 复丝断裂延伸率

图3 三个厂家三项测试结果散点图

Fig. 3 Scatter plot of three test results from three manufacturers

图3展示了三家厂商三种测试的测试结果汇总图。统计分析结果表明,厂家A与厂家B在拉伸强度、弹性模量及断裂延伸率三项性能指标的批次均值具有较高的趋同性,厂家A与厂家C的测试数据表

现出良好的稳定性,其离散系数均低于2.6%,表明数据分布具有理想的集中性特征。通过目视检查筛选未发现比大多数观测值低很多或高很多的观测值,进一步计算各批次的最大赋范残差检验统计量(MNR),结果显示三项测试的数据均无异常数据。

2.2 批间变异性检验

K样本 Anderson-Darling 作为一种非参数统计方法,被用于评估多组数据集的同源性假设。各项试验的统计量和检验结果如表4所示。

表4 复丝拉伸强度测试三个厂家测试数据的ADK检验
Tab. 4 ADK test for tensile strength data of filament from three manufacturers

测试项目	厂家	ADK	ADC($\alpha=0.025$)	是否是同一母体
拉伸强度	A	1.885	1.967	是
	B	0.993	1.967	是
	C	1.965	1.967	是
拉伸模量	A	0.618	1.967	是
	B	0.899	1.967	是
	C	2.241	1.967	否
断裂延伸率	A	0.700	1.967	是
	B	0.918	1.967	是
	C	0.942	1.967	是

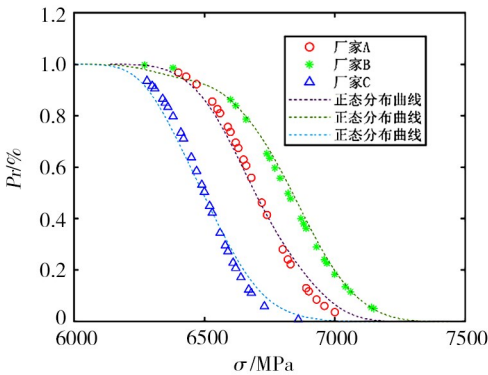
总体来看,观测样本数量较多,使得批次间的差异较小,厂家A和厂家B的三项测试的数据可排除批间差异,厂家C的复丝模量测试数据存在批间差异,其原因是此项测试数据的离散系数较低,极低的批内分散性而使得ADK检验的结果过于敏感,出现统计学意义上的批间差异。根据手册推荐,如果测试数据的离散系数低于4%,那么即使ADK检验的结果表明批间存在差异,也可对各批次数据进行合并。结合实际工程经验判断,厂家C的试样均源自同一纤维卷轴,且所有测试值均处于合理波动范围内,因此排除批间差异性,将C厂家复丝模量测试各批次的测试数据加以合并。根据手册要求,合并后数据还需要进行异常数据检测以确保后续分析的可靠性和可信度,将同一厂家每项测试的各批次数据合并为一个数据组并进行MNR检测后的结果均无异常。

2.3 分布拟合度检验

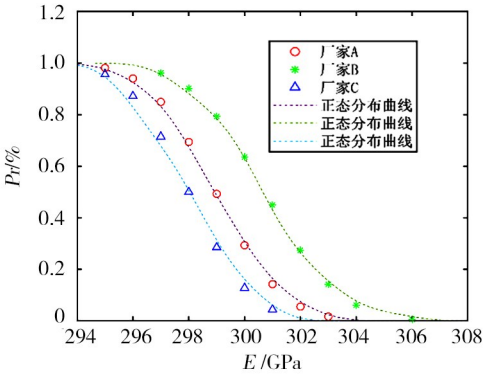
3个厂家测试数据的正态分布显著性水平(OSL)结果如表5所示。手册推荐当 $OSL \geq 0.05$ 时优先选择正态分布计算B基准值。计算结果显示,所有测试数据的OSL均大于0.05,可采用正态分布计算测试数据的B基准值。为确保采用正态分布形式计算B基准的可靠性,进一步图解法检查测试数据的正态性。图4给出了根据3个厂家三种测试数据拟合出的正态分布曲线。

表5 分布拟合度检验的正态分布的显著性水平(OSL)
Tab. 5 Observed significance level (OSL) for goodness-of-fit test of normal distribution

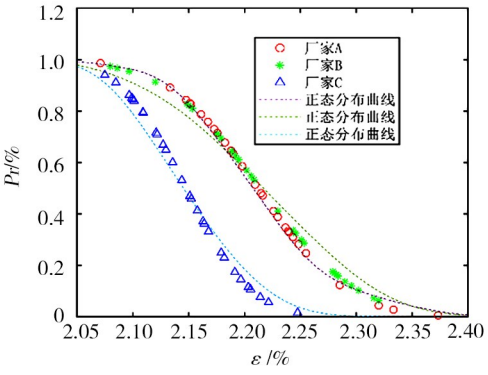
厂家	复丝拉伸强度	复丝拉伸模量	复丝断裂延伸率
厂家A	0.552	0.313	0.271
厂家B	0.257	0.217	0.317
厂家C	0.441	0.089	0.516



(a) 复丝拉伸强度



(b) 复丝拉伸模量



(c) 复丝断裂延伸率

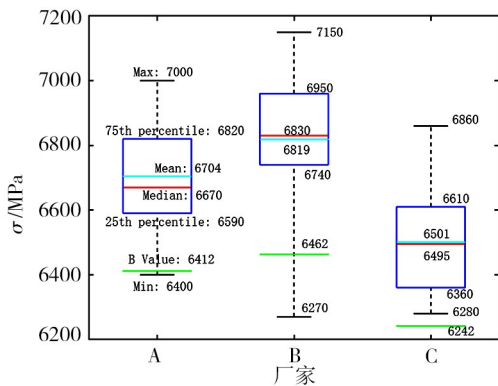
图4 三个厂家三项测试结果正态分布拟合图
Fig. 4 Normal distribution fitting plot of three test results from three manufacturers

从图4中可以看出各测试数据与所预期的各自的正态分布曲线非常接近,合并后的测试数据也与期望的正态分布曲线的偏差较小,结果证明,通过上述检验后推论数据呈正态分布的结论是可接受的,

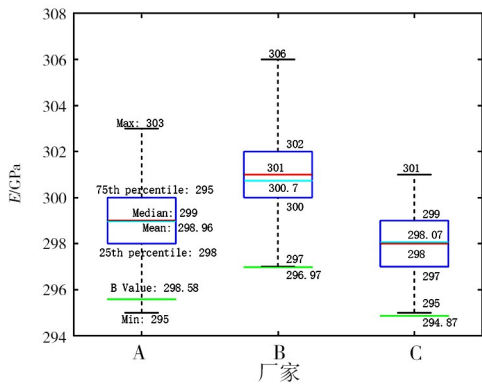
采用正态分布形态计算数据的B基准值是合理的。

2.4 B基准值计算

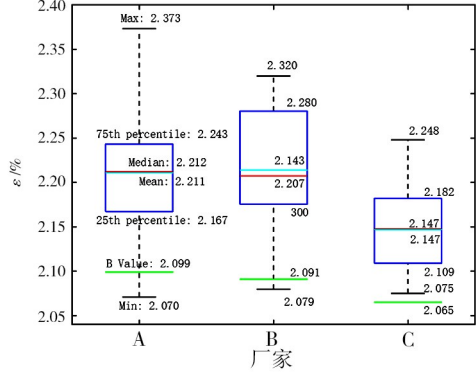
基于全部测试数据绘制的箱线图及B基准值的位置分布情况如图5所示。



(a) 复丝拉伸强度



(b) 复丝拉伸模量



(c) 复丝断裂延伸率

图5 三个厂家三项测试结果B基准值与其他统计值对比
Fig. 5 Comparison of b-basis values and other statistical values for three test results from three manufacturers

使用单点法计算B基准值,正态分布模型下95%置信水平,95%可靠度的B基准值相关统计量及计算结果如表6所示。

图5中箱体尺寸反应测试数据的分散程度,箱体的上下边界分别对应于第25百分位数(Q1)和第75百分位数(Q3)。箱体的“须线”延伸至数据的最大值和最小值,进一步展示了数据的全距分布。此外,红宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025年 增刊1

表6 三个厂家三项测试B基准计算结果汇总表
Tab. 6 Summary table of b-basis calculation results for three tests from three manufacturers

测试项目	厂家	均值	标准差	单侧容限系数	B基准值
拉伸强度	A	6 704.333	164.562	1.776	6 411.996
	B	6 819.000	200.609	1.776	6 462.627
	C	6 501.333	145.927	1.776	6 242.099
拉伸模量	A	298.967	1.902	1.776	295.587
	B	300.732	2.116	1.776	296.974
	C	298.071	1.762	1.776	294.871
断裂延伸率	A	2.211	0.064	1.776	2.099
	B	2.214	0.069	1.776	2.091
	C	2.147	0.047	1.776	2.065

线表示样本数据的中位数(Median),蓝色线表示样本数据的均值(Mean),绿色水平线表示B基准值(B value)σ。

以图5为例,A厂家的拉伸强度测试结果显示,其最大值为7 GPa,最小值为6.4GPa,B基准值为6.412 GPa。这一结果表明,A厂家的材料性能具有较高的稳定性,且数据分布较为集中。B厂家的拉伸强度测试结果显示其最大值为7.150 GPa,最小值为6.270 GPa,B值为6.462 GPa。测试数据则呈现出较大的波动性,但其均值与中位数较为接近,表明数据分布相对对称。C厂家的拉伸强度分布相对较低,最大值为6.860 GPa,最小值为6.242 GPa,B值为6.495 GPa。与A厂家类似,C厂家的数据波动性较小,且分布较为集中。其他测试结果也呈现出类似的趋势。

从图5中进一步分析可知,C厂家的拉伸模量和断裂延伸率的B基准值均低于测试数据中的实际最小值。这一现象在统计学上是合理的,因为B基准值是基于特定的统计模型和假设条件计算得出的理论统计量,其本质反映了在给定置信水平下材料性能的下限估计值,其计算过程综合考虑了样本容量、数据分布特性及统计置信度等因素,与测试数据中的实际最小值无直接联系。因此,B基准值并不必然大于实测数据的最小值。

3 结论

(1)从性能高低的角度来看,所有测试数据均通过正态分布拟合优度检验,且显著性水平(OSL)均大于0.05,满足采用正态分布计算B基准值的前提假设。采用正态分布形态计算数据的B基准的大小关系为:厂家B>厂家A>厂家C,B厂家的复丝性能较高。

(2)从性能稳定性的角度来看,B厂尽管力学性能指标较高,但其数据波动性亦相对较大。A厂家和C厂家的性能测试数据离散性较小,稳定性优于B厂家,性能稳定性的关系为:厂家A>厂家C>厂家B,A厂家的复丝的稳定性较高。

(3)B基准值作为一种保守性材料性能下限估计指标,能够有效反映材料的可靠性水平。所建立的B基准值计算流程具备较强的通用性,可为复合材料基础性能评价及工程选材提供理论支持与实践参考。

参考文献

- [1] SPENDLEY P R. Design allowables for composite aerospace structures[D]. Guildford; University of Surrey, 2012.
- [2] 汪梓迅, 矫维成, 赫晓东. 复合材料B基准值计算方法研究进展[J]. 复合材料学报, 2021, 38(6): 1669-1677.
- WANG Zixun, JIAO Weicheng, HE Xiaodong. Research progress in calculation method of composite material's B basis [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(6): 1669-1677.
- [3] BARBERO E, FERNÁNDEZ-SÁEZ J, NAVARRO C. Statistical analysis of the mechanical properties of composite materials [J]. Composites Part B: Engineering, 2000, 31(5): 375-381.
- [4] EKVALL J C, GRIFFIN C F. Design allowables for T300/5208 graphite/epoxy composite materials [J]. Journal of Aircraft, 1982, 19(8): 661-667.
- [5] DEFENSE U D O. Composite materials handbook-MIL 17, Volume I: Guidelines for characterization of structural materials[M]. Crc Press, 1999.
- [6] Federal Aviation Administration. Composite materials hand-book Volume1. Polymer matrix composites: Guidelines for characterization of structural materials; MIL-HDBK-17-1F[S]. Washington, D. C., Federal Aviation Administration, 2002
- [7] Material qualification and equivalency for polymer matrix composite material systems: Updated procedure[M]. DOT/FAA/AR03/19, 2003.
- [8] INTERNATIONAL S. Composite materials handbook (CHM-17), Volume 1: Polymer matrix composites[M]. McGraw-Hill, 2013.
- [9] ROSARIO Z D, FENRICH R W, IACCARINO G. When are allowables conservative? [J]. AIAA Journal, 2021, 59(5): 1-13.
- [10] VALLMAJO O, COZAR I R, FURTADO C, et al. Virtual calculation of the B-value allowables of notched composite laminates [J]. Composite Structures, 2019, 212(MAR.): 11-21.
- [11] CÓZAR I R, TURON A, GONZÁLEZ E V, et al. A methodology to obtain material design allowables from high-fidelity compression after impact simulations on composite laminates [J]. Composites Part A Applied Science and Manufacturing, 2020, 139(1): 106069.
- [12] 聚合物基复合材料力学性能数据表达准则[S]. HB 7618—2013(2017).
- Data expression criteria for mechanical properties of polymer matrix composites[S]. HB 7618—2013(2017).
- [13] 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(S1): 19-21, 24
- SUN Jianshi, YE Qiang. Aeronautical manufacturing technology composite material mechanical performance data B benchmark value calculation program[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2009(S1): 19-21, 24.
- [14] 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): 10401-10407.
- 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): 10401-10407.
- [15] 毛建晖, 陈文光, 李秀海. 风电叶片复合材料许用值计算方法研究[J]. 玻璃纤维, 2023(4): 10-15.
- MAO J H, CHEN W G, LI X H, Research on the calculation method for allowable values of composites for wind turbine blades [J]. Fiber Glass, 2023(4): 10-15.
- [16] FAA. Composite aircraft structure [S]. AC20-107B, 2009.
- [17] FAA. Material qualification and equivalency for polymer matrix composite material systems: updated procedure [S]. USA: FAA, DOT/FAA/AR-03/19, 2003: 55-78.
- [18] 中国航空研究院. 复合材料结构设计手册(精) [M]. 航空工业出版社, 2004.
- [19] 全国信息与文献标准化技术委员会. 文献著录: 第4部分非书资料: GB/T 3362—2017 碳纤维复丝拉伸性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 3
- [20] RUST S W, TODT F R, HARRIS B, et al. Statistical methods for calculating material allowables for MIL-HDBK-17 [M]. CHAMIS C C, Ed. Test Methods for Design Allowables for Fibrous Composites, ASTM STP 1003, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989: 136-149.