

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210223.004

## 复合材料 B 基准值计算方法研究进展



分享本文

汪梓迅<sup>1</sup>, 矫维成<sup>\*1,2</sup>, 赫晓东<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 特种环境复合材料技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 深圳烯创先进材料研究院有限公司, 深圳 518000)

**摘要:** 在复合材料的结构设计中, 复合材料的许用值是关键参数之一。通常采用 B 基准值这一统计量作为复合材料的许用值, B 基准值是具有 95% 置信度的 90% 置信下限。准确计算复合材料的 B 基准值是复合材料安全、可靠应用的保障。本文归纳总结了复合材料 B 基准值计算方法的研究进展, 详细分析了单点法、多环境样本合并法的计算原理、计算过程、适用条件等。结合工程实例数据, 分析了不同方法对 B 基准值计算结果的影响。最后, 对复合材料 B 基准值计算方法的发展趋势及预期研究方向进行了展望。

**关键词:** 复合材料; B 基准值; 单点法; 多环境样本合并法

中图分类号: TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2021)06-1669-09

## Research progress in calculation method of composite material's B basis

WANG Zixun<sup>1</sup>, JIAO Weicheng<sup>\*1,2</sup>, HE Xiaodong<sup>1,2</sup>

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Composites in Special Environments, Harbin

Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Shenzhen STRONG Advanced Materials Research Institute

CO. LTD., Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** In the structural design of composite materials, the allowable value is one of the key parameters. The statistic of B basis is usually used as the allowable value of composite materials, and the B basis is the lower limit of 90% confidence with 95% confidence. Accurate calculation of the B basis of composite materials is the guarantee for the safe and reliable application of composite materials. This article summarizes the research progress of the calculation method of the composite material's B basis, and analyzes in detail the calculation principle, calculation process and applicable conditions of the single-point method and the pooling method. And combined with the project data, the influence of different methods on the calculation results of the B basis is analyzed. Finally, the development trend and expected research direction of the calculation method of composite material B basis are prospected.

**Keywords:** composite materials; B basis; single-point method; pooling method

准确评价复合材料的力学性能是其安全、可靠应用的关键。相比于传统金属材料, 复合材料的力学性能会有很大的变异性。原因是复合材料的材料与结构同时形成, 制造期间的操作差异、原材料的差异、检验时的差异及材料固有的变异性等因素都会导致复合材料性能数值的较大变异性<sup>[1-4]</sup>。对此美国军方在对复合材料力学性能做出大量研究的基础上, 结合统计学与材料学的相关

知识提出了复合材料 B 基准值的概念, 即定义在 95% 的置信度与力学性能的限定下, 90% 性能数值群的值高于此值。复合材料 B 基准值的研究给复合材料的设计提供了明确的依据, 已成为评判复合材料各种力学性能的最关键数据<sup>[5-9]</sup>。随着 B 基准值研究的不断深入, 其计算结果越来越精确, 需要的样本量越来越少, 但是仍然存在着成本过高、复杂结构难以实验及现阶段应用广泛的仿真

收稿日期: 2020-11-16; 录用日期: 2021-02-12; 网络首发时间: 2021-02-23 14:58:38

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210223.004>

基金项目: 国家自然科学基金(U1837203); 国家重点研发计划课题(2018YFA0702802); 深圳市科技计划(KQTD2016112814303055)

通信作者: 矫维成, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为树脂基复合材料 E-mail: [xiaojiao458@163.com](mailto:xiaojiao458@163.com)

引用格式: 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(in Chinese).

手段难以在复合材料领域推广等诸多问题<sup>[10]</sup>。国内对 B 基准值的研究一直处于跟踪研究状态, 对不同方法, 不同版本计算结果的影响研究均较少, 目前尚未形成统一的结论。

### 1 复合材料 B 基准值计算方法研究历程

美国对复合材料许用值的研究很早, 在上个世纪 60 年代后就提出了 B 基准值的概念, 随着实践中的不断应用与探索, 现在已经成为国际上通用的复合材料使用标准。复合材料 B 基准值计算方法研究过程, 归纳总结如图 1 所示。可知, 早在 1971 年 1 月, 美国军方就颁布了《美国军用手册》第 17 分册 (MIL-HDBK-17) 第一版 MIL-HDBK-17A (Plastics for Air Vehicles-《航空飞行器用塑料》), 奠定了对复合材料 B 基准值的研究开端。

随着先进复合材料的应用不断壮大, 美国于 1978 年在国防部内成立了《美国军用手册》第 17 分册协调委员会, 在 1988 年, 该委员会颁布了 MIL-HDBK-17B, 并将手册更名为《复合材料手册》(Composite Materials Handbook), 该手册率先给出了 B 基准准确概念<sup>[5]</sup>。随着先进复合材料在民用领域的应用不断壮大与研究的不断深入, 在 2002 年 6 月, 委员会颁布了 MIL-HDBK-17F<sup>[11]</sup>, 并给出了计算 B 基准值的方法和相关的程序, 该统计程序针对单一环境的样本数据进行统计计算, 即单点法。手册提出了完备的单点法计算方法, 将数据分为结构型数据与非结构型数据, 并且针对非结构性数据提出要将威布尔分布的优先度提到最高, 而结构型数据采用 ANOVA 法计算 B 基准值。

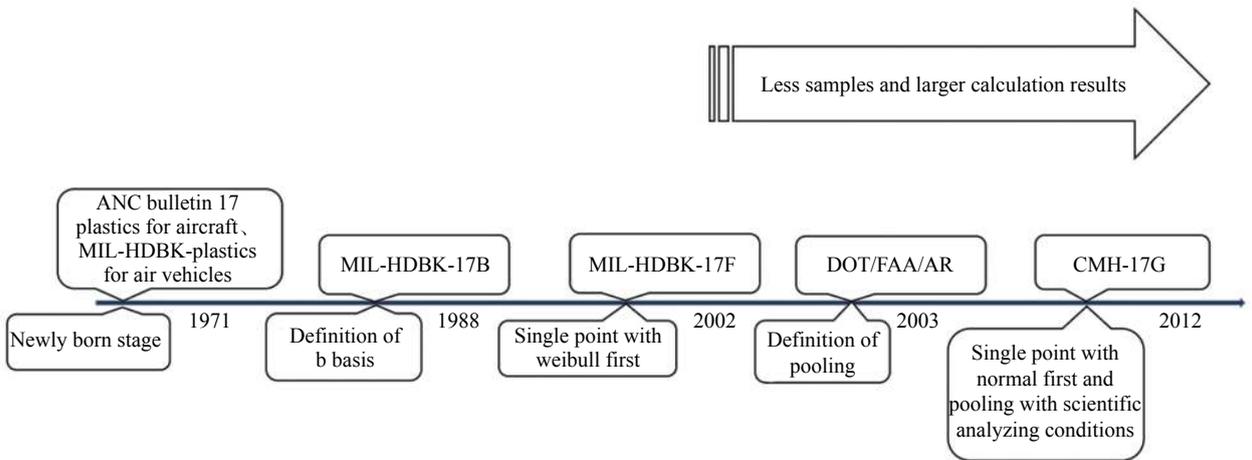


图 1 复合材料 B 基准值计算方法发展历程<sup>[3-5]</sup>

Fig. 1 History of B basis<sup>[3-5]</sup>

由于单点法检测成本过高、随着批次选取的不同差异较大及计算值过于保守的问题, 在 2003 年 9 月, 美国联邦航空管理局 (FAA) 在原有的统计方法的基础上, 在 DOT/FAA/AR - 03/19<sup>[12]</sup> 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 (Pooling Method) 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。但是由于计算条件过于苛刻, 更新程序中有关经验介绍的不够详实等原因, 一直未得到广泛的应用, 除了在很理想的数据条件下, 大多数还是回归了单点法的计算方法, 而针对单点法而言, 更新程序中改变了批间变异性检

验的标准, 使数据更加容易通过检验, 并且将正态分布的优先性排至最高。应用多环境样本合并法在实际数据统计中, 受环境条件数和批次数的限制, 若不加以工程经验判断则这些数据很难通过假设<sup>[13]</sup>。如果不采用合并法而选择单点法, 得到的 B 基准值结果又比较保守。更新程序允许在 B 基准值的计算中加入经验判断, 但是未给出过具体的判断方法, 同时更新程序也最早对样本的离散系数做出了研究。

2006 年后, 第 17 分册协调委员会的归口管理机构从美国国防部改为美国联邦航空局, 并退出原先的军用手册系列体系, 转向汽车领域, 改为 CMH-17 (Composite Materials Handbook-17), 继

续不断地将新的研究成果纳入手册中。在 2012 年 3 月, 委员会陆续的颁布了最新的 CMH-17G<sup>[14]</sup> 版, 用以代替 MIL-HDBK-17F。CMH-17G 中全面地更新了 B 基准值的计算流程, 相较于 MIL-HDBK-17F 无论在内容完整性还是在工程设计的指导方面都有较大的变化。首次给出了批间变异性、方差等同性、正态拟合优度等统计手段和工程经验判断方法, 可以用来判断多环境样本是否满足合并条件。针对单点法而言, 做出了诸多改进研究, 首先其将 MIL-HDBK-17F 中单点法优先推荐的威布尔分布改成正态分布, 还针对单点法中的非参数法根据样本数的不同提出了大样本的非参数基准值(样本数  $n$  大于 28 个)计算方法和 Hanson-Koopmans 方法(样本数  $n$  小于 29 个)两

种方法。另外完善了结构性数据的 ANOVA 计算方法, 并分析了其各种计算的误差, 提出了线性统计模型的回归分析。针对多环境样本合并法, 给出了方差等同性、批间变异性及正态分布的检验方法。对可合并的环境条件做出明确表述, 给出了合并离散系数和合并标准差两种计算方法, 让 B 基准值的计算更加实用。目前 CMH-17G 计算的结果在很大程度上更加接近理论的 B 基准值, 数值往往较 MIL-HDBK-17F 更大, 在国外已经得到广泛应用<sup>[15]</sup>。

## 2 单点法计算原理及过程

单点法是计算复合材料 B 基准值最早的方法。MIL-HDBK-17F 中规定的计算流程如图 2 所示。

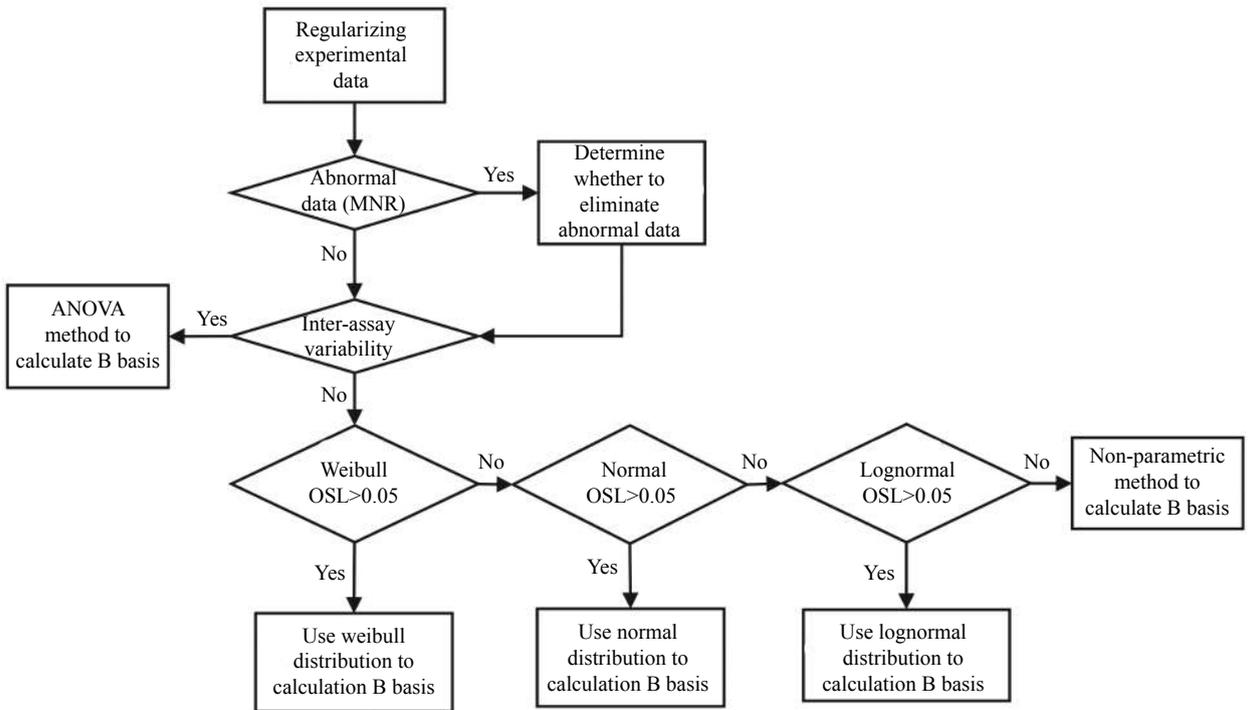


图 2 MIL-HDBK-17-1F 单点法计算流程<sup>[10-15]</sup>

Fig. 2 MIL-HDBK-17-1F single point method calculation process<sup>[10-15]</sup>

该方法原理是在破坏  $n$  个试样前, 想象每一个试样均有一个可以描述成符合某个共同的概率分布的强度值。试件破坏后得到了  $n$  个值以后, 若  $n$  足够大, 便可以接近该未知分布。这一概率分布称为母体, 而  $n$  个值的数学定义为随机样本。因此, 如果重复获得大小为  $n$  的随机样本并多次计算基准值, 其中有 95% 次的计算值将低于第十分位百分位点, 这就是 B 基准值。而根据统计学

原理, 复合材料的各种性能大致均符合正态分布、威布尔分布及对数正态分布中的一种。以正态分布为例, 在正态分布 B 基准值的计算公式  $B = \bar{x} - k_B s$  ( $\bar{x}$  为样本均值,  $k_B$  为容限系数,  $s$  为标准差) 中, 由于用  $n$  个数据代替总体的分布, 其中的系数  $k_B$  一定会大于正态分布的第十分位百分位点系数 1.282, 由于计算的数值一定会小于用正态分布模拟的 B 基准值, 不会导致大于理论值的计

算数值存在,但是如果数据样本足够大,随着样本容量的增加,计算的结果会越来越精确,B基准值会越来越大<sup>[16]</sup>。这也是后来,单点法转换为多环境样本合并法的理论基础。

单点法中,B基准值的计算步骤一般可以分为以下四步:(1)数据正则化处理。将原始试验值调整到单一(规定)纤维体积含量;(2)每批材料的异常数据检验。将数据通过计算最大赋范残差统计量(MNR)检验数据。MNR检验是识别非结构型数据组中异常数据的一种筛选方法。除了MNR检测法以外,根据统计学的相关原理,还有格拉布斯检验法、迪克逊检验法等,其原理都是将非异常数据当成正态分布的总体对异常数据进行筛选<sup>[15]</sup>;(3)样本的批间变异性检验。Anderson-Darling检验时用来检验从中抽取两组或多组数据是否是来源同一母体。通过A-D检验将数据分为结构型数据(可以进行自然分组的数据,或所关注的响应随已知因素系统变化的数据)和非结构型数据(所有相关信息均包含在测量结果自身中的数据)两种;(4)拟合优度检验。针对非结构型数据,需要对其分布模式进行拟合。MIL-HDBK-17-1F手册中,针对非结构型数据的拟合优度检验优先采用威布尔分布方法,这也是MIL-HDBK-17-1F与现有的复合材料手册最大的本质性区别,MIL-HDBK-17-1F指出其主要原因为据数学计算证明威布尔分布模拟脆性材料时拟合度较高,并且单向复合材料的“束链”强度模型表明威布尔分布适合于此类复合材料强度分布。若威布尔分布方法的观测显著性水平(OSL:度量A-D检验统计值至少与计算值的极值相当的概率)不符合要求,再采用正态分布和对数正态分布进行拟合优度检验,若三种分布均不符合,则采用非参数法计算B基准值<sup>[12,14]</sup>。

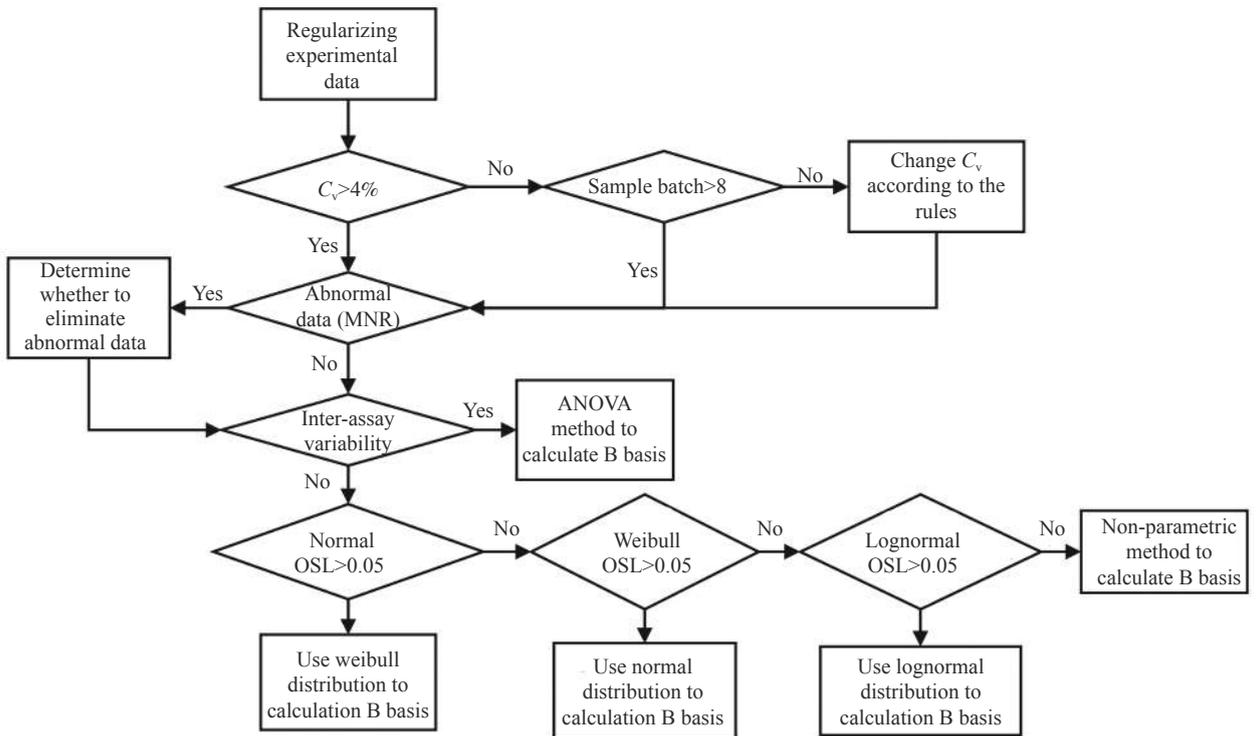
CMH-17G中规定的单点法计算步骤大致与MIL-HDBK-17-1F相同,其规定的计算步骤如下图3所示。与MIL-HDBK-17-1F相比,其改变以下四个方面的内容:(1)放宽了批间变异性的要求,使样本数据更加容易通过检验;(2)对不同情况下样本的离散系数( $C_v$ )做出了修改。①如果 $C_v$ 值小于4%,则改为6%。②如果 $C_v$ 值在4%~8%之间,则改为 $(0.5 \cdot C_v) + 4\%$ 。③如果 $C_v$ 值大于8%,则不作修改。变换离散系数以后,材料每批性能数据也相应发生改变。需要注意之后的异常数据检

验和批间变异性检验都需要用转换离散系数后的数据进行计算;(3)将正态分布的优先度提前,在满足正态分布OSL的前提下优先选用正态分布,使大部分计算结果变大。CMH-17-G将正态分布的优先度提到最高,其指出只有在如下情况下,当正态分布的OSL>0.05时才会选取其他模型:①对于多个环境数据的同一性能样本,若其他环境的模型均不为正态分布,出于一致性的考虑,应该将符合正态分布的环境数据改成与诸多样本相同的分布;②若其他分布的OSL远远大于正态分布的OSL值时,也应该选择其他模型。但是此种情况一般仅仅出现于大样本数据(数据点一般在60以上),当其他模型的OSL值是正态分布的10倍时,采用其他分布可以更加拟合数据。根据研究表明,正态分布的OSL值位于5%~10%,而其他模型的OSL值位于50%~100%之间时,非正态分布会更好的拟合数据。关于选用正态分布的原因,手册中说明以下三个方面原因:①正态分布能更好地模拟大样本的复合材料强度数据;②在判断是否有异常数据计算MNR时及批间变异性等计算时,就已经用到了数据组是正态分布的相关假设,如果强行用威布尔分布,会使逻辑难以自洽;③没有可观的数据量,区分正态分布、威布尔分布和对数正态分布的区别十分困难,即在小样本情况下,几种分布得到的数据并无明显差距<sup>[14]</sup>。结合计算研究表明,威布尔分布的计算值一般较正态分布均偏小<sup>[11]</sup>;(4)对非参数法和回归法等其他计算原理与方法也提出了修改,使计算更加科学。

将正则化后未通过批间变异性检验的结构型数据而言,手册规定通过ANOVA法计算B基准值。当样本批次过小时(小于5批次),采用此方法会获得非常保守的B基准值。该方法有如下3个假设:(1)每批数据服从正态分布;(2)各批次的批内方差相等;(3)批次均值符合正态分布。

### 3 多环境样本合并法计算原理及过程

多环境样本合并法的计算具体流程如图4所示。多环境样本合并法是基于单点法的基础之上的,其大部分计算步骤与单点法类似,主要有以下五个步骤:(1)将数据正则化与改变离散系数;(2)每批材料的异常数据检验;(3)批间变异性检验;(4)将合并后的整体数据再次利用MNR法进行异常数据检验;(5)数据合并。在通过批间变异性检验后的数据组合并中,CMH-17G规定了待合

图3 CMH-17G 单点法计算流程<sup>[10-15]</sup>Fig. 3 CMH-17G single point method calculation process<sup>[10-15]</sup>

并的各环境条件必须相邻,并且须包含 RTA(常温干态)的环境条件,合并的每种环境的破坏模式必须是相似的,必须以可接受的破坏模式发生破坏。

尤其要说明的是,第(5)步的数据合并,需要遵守以下原则:①根据各自均值对每种环境下的样本数据进行第二种正则化处理:将每个数据除以该条件下的环境样本均值;②对不同环境样本的方差进行等同性检验:如果由于某个环境样本的方差与其他样本差异过大导致无法通过方差等同性检验时,需要将其剔除,对剩余的大于等于两个环境样本的数据进行计算,被剔除的环境样本可以使用单点法进行计算;③对正则化的合并数据进行正态分布检验:在显著性水平为 0.05 的条件下重新使用 Anderson-Darling 检验量进行检验,如果拒绝了正态分布的假设,需要对所有的环境样本进行单点法分析。在合并计算中,CMH-17G 规定了两种方法,合并离散系数与合并标准差法具有一系列的理论支持,其计算的本质为每种环境样本的均值减去一个常数值;而合并离散系数法在实际应用中可能更好地适用于复合材料的物理属性,其计算的本质为每种环境的样本均值除以一个常数值。通过方差等同性检验的数据组应采用合并标准差的方法计算<sup>[12-13,15-19]</sup>。

#### 4 不同方法对 B 基准值计算结果影响分析

为了研究不同计算方法对 B 基准值计算结果的影响,本文采用上述规定的复合材料 B 基准值计算步骤,将某科研院所提供的 3 000 余条碳纤维增强环氧树脂复合材料拉伸性能、层间剪切性能、三点弯曲性能等基本力学性能数据进行了 B 基准值的计算分析及对比验证,结果讨论如下。

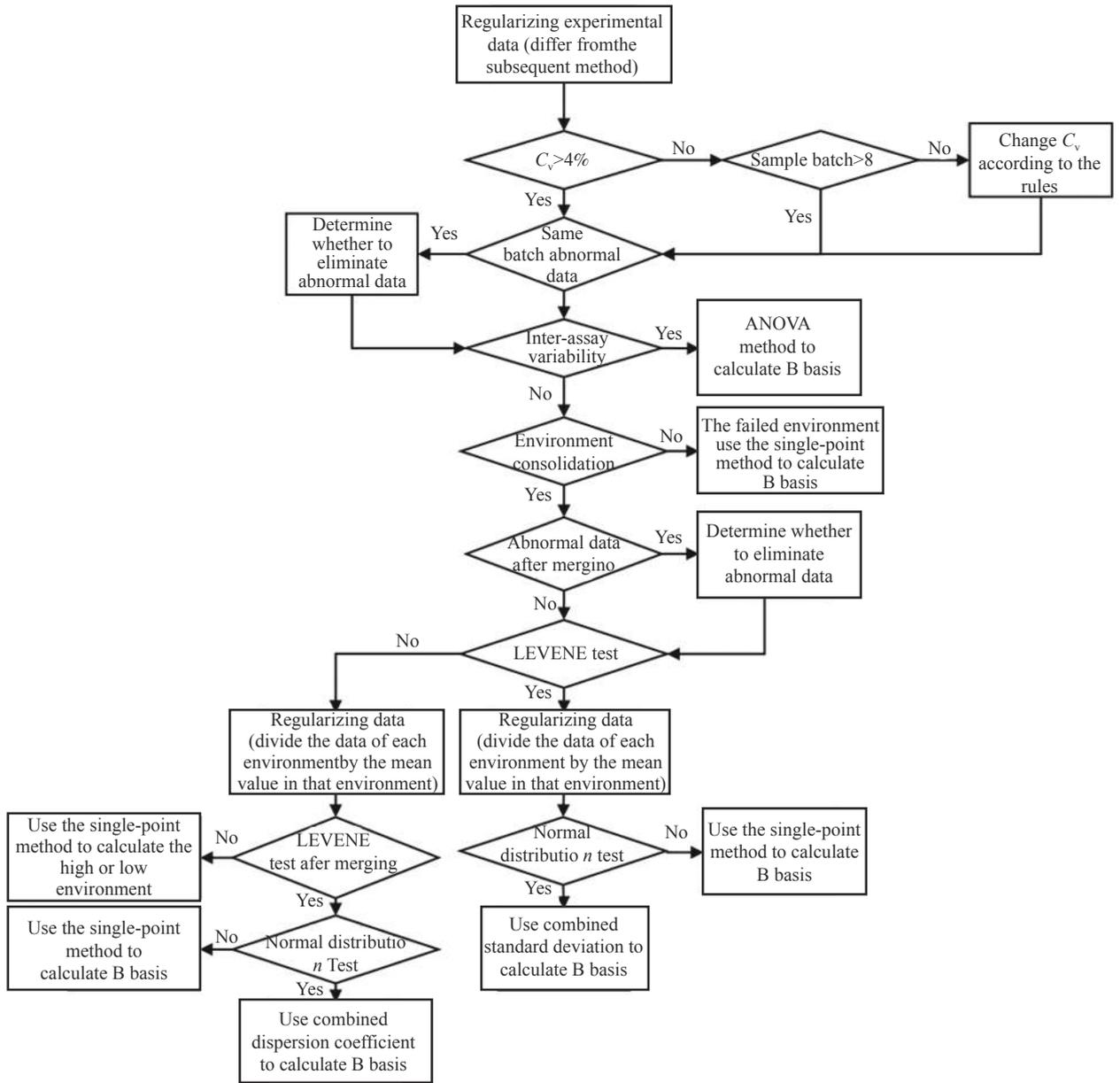
##### 4.1 单点法计算结果分析

采用单点法分别计算了改变离散系数下的威布尔分布与正态分布,未改变离散系数下的威布尔分布与正态分布(当威布尔分布 OSL 大于正态分布 10 倍以上时,根据手册中的规定,仅仅采用威布尔分布进行计算),为了更直观的展现研究结果,定义了一个新的数学量  $L$ ,  $L$  表示 B 基准值与样本均值的比值,称为 B 基准率<sup>[20]</sup>。 $L$  值越大代表计算的复合材料 B 基准值结果越大。 $L$  的计算式为

$$L = \frac{B}{\bar{X}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\bar{X}$ 为样本均值; $B$ 为计算得到的 B 基准值。

计算结果表明,在满足离散系数大于 6% 与威布尔分布 OSL 不大于正态分布 OSL 10 倍以上这两个前提下,威布尔分布的计算结果均比正态分布



$C_v$ —Coefficient of variation

图4 CMH-17G 多点法计算流程<sup>[10-15]</sup>

Fig. 4 CMH-17G Pooling Method calculation process<sup>[10-15]</sup>

小, 结果如图 5 所示。

按 CMH-17G 手册中规定的离散系数变化方法变化后, 由于增大了离散系数, 会使计算结果明显变小, 并且离散系数的变化明显使批间变异性的通过率变大。通过改变离散系数解决了由于试验件通常是同时同批次生产出来而导致的不符合复合材料制作一般化的问题, 使计算结果更加符合实际应用的情况。由于数据过多, 仅使用正态分布的前后变化为例作图说明, 具体结果如图 6 所示。并且此时正态分布  $L$  与威布尔分布  $L$  的差

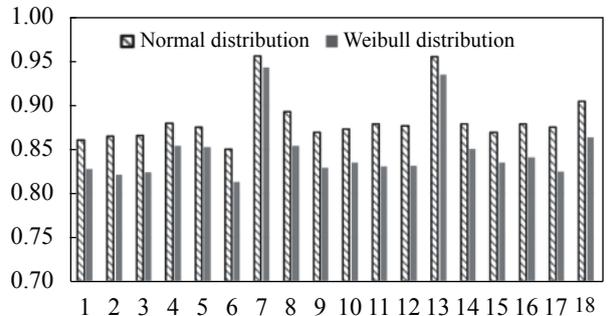


图5 威布尔分布与正态分布的  $L$  比较

Fig. 5  $L$  comparison of Weibull distribution and Normal distribution

值也会变大,即一组数据改变离散系数后,正态分布与威布尔分布的差异会进一步拉大,具体计算结果如图 7 所示。

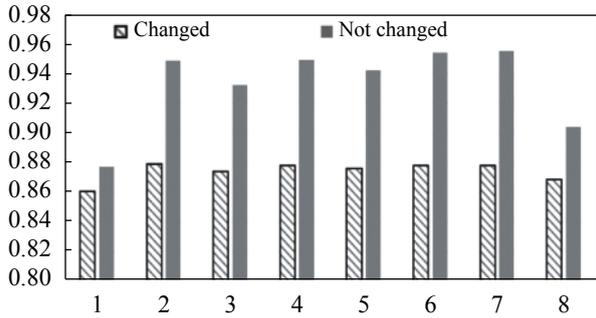


图 6 离散系数变化前后正态分布的  $L$  比较

Fig. 6 Comparison of  $L$  before and after variation of dispersion coefficient

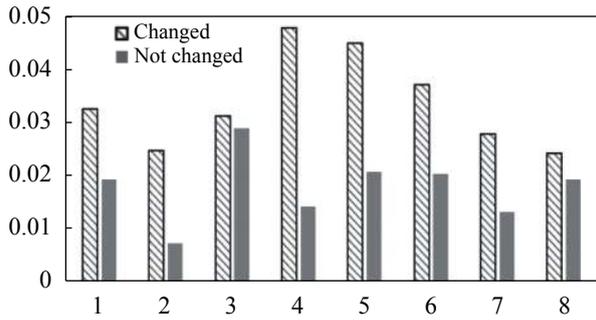


图 7 离散系数变化前后正态分布与威布尔分布  $L$  之差

Fig. 7  $L$  graph of the normal distribution minus the Weibull distribution before and after the dispersion coefficient changes

综上计算结果表明:(1)在均满足 OSL 的条件下,发现如果正态分布的  $OSL > 0.05$ ,一般而言威布尔分布的 OSL 也大于 0.05。但是,满足威布尔分布的 OSL 一般不具有上述规律;(2)采用 CMH-17G 推荐的方法,在改变离散系数以后,会使计算结果明显变小,同时也会使威布尔分布与正态分布的差距进一步拉大,并且大概可以使 40% 原本无法通过 ADK 批间变异性检验的数据组顺利通过检验,因所有数据均通过同一个公式变化而来,因此大大增加了其来源于同一个母体的假设;(3)单点法计算结果均在样本均值的 80%~95% 之间,其中改变了离散系数后的计算结果均在 90% 以下,这对未来在工程中的粗略计算 B 基准值提供了一定的建议;(4)采用 MIL-HDBK-17F 推荐的单点法,存在部分威布尔分布比正态分布计算结果略微大的现象,但是仅限于离散系数很小或者威布尔分布的 OSL 大于正态分布 10 倍以上的情况下。在满足 OSL 条件与离散系数条件时,采用正态分布计算

B 基准值的结果均比威布尔分布计算的结果大,具体范围在 2%~7% 之间;(5)结构型数据的 ANOVA 法与强制按照结构型的数据计算方法得到的结果比较表明其没有明显的联系。

#### 4.2 多环境样本合并法与单点法计算结果分析

将多环境样本合并法的计算结果与单点法计算结果进行比对后发现,多样本环境合并法的计算结果大于单点法计算的结果,强制剔除随机的数据之后,多环境样本合并法的计算结果也更加稳定。具体计算结果如图 8 所示。

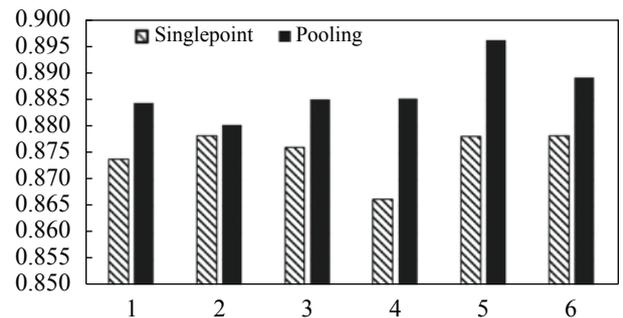


图 8 单点法与多环境样本法  $L$  比较

Fig. 8  $L$  comparison between single point method and pooling method

为了研究合并离散系数与合并标准差法的差异,强制将环境数据样本均值分别为 60、70、80、90、100 的 5 组数据分别强制按照多环境样本合并法中的合并离散系数和合并标准差的方法计算,计算结果如图 9 所示<sup>[6]</sup>。

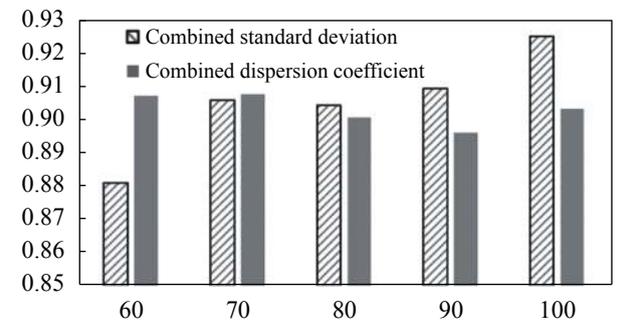


图 9 合并离散系数与合并标准差  $L$  比较

Fig. 9  $L$  comparison of combined dispersion coefficient and combined standard deviation

综上计算结果表明:(1)多环境样本法在绝大多数情况下都比单点法的计算结果要大,并且其计算的结果与单点法对比后在不同环境之间的显得更加集中,由于其本质就是每种环境的样本均值共同减去一个数或者共同比上一个数,没有那

么分散, 稳定性更好; (2) 多环境样本合并法仍然还需要更进一步的修正, 其虽然使计算所需样本数量降低, 但是其大多数情况下都很难使所有的环境都通过批间变异性检验, 而且其对常温干态和相邻环境条件的要求较苛刻, 限制了其进一步的使用, 并且一旦采用多环境合并样本法的计算数据组后, 若该批次环境被剔除, 这批环境会由于数据组不够而只能使用小样本的 B 基准值计算方法, 此时计算结果会由于样本数据的变化而发生明显的变化; (3) 大多数情况下, 合并离散系数与合并标准差只有细微的差别, 然而对于环境均值最大与最小的样本, 差距会变大。由于合并标准差法是样本均值减去容限系数的相关函数, 因此样本均值数值偏大时, 其计算结果一般大于合并离散系数。

## 5 结论与展望

(1) 从最早的 MIL-HDBK-17B 到目前的 CMH-17G, 复合材料 B 基准值计算一直在朝着需要更小的样本量、得到更可靠更乐观的结果方向发展。在已有 CMH-17G 手册中规定的材料批次的条件下, 若能进行环境合并, 首选多环境样本合并法会使 B 基准值的计算结果更可靠, 同时也更稳定, 能够更好符合材料的实际应用情况。针对不能合并环境的数据组, 在试件满足 3 批次、每个批次不小于 6 个样本的数量条件下, 采用单点法的计算结果也具有很强的可靠性, 若不满足以上样本数量的条件, 可以采用小样本的计算方式进行粗略地估算 B 基准值。

(2) 针对复合材料试验件制造存在同批次产生的差异过小导致实验中的力学性能存在离散系数过小从而需要修订的问题, 如果按照手册规定强制修订离散系数后, 对 B 基准值计算带来的影响难以评估。未来的研究方向, 可以在计算方法中引入修正因子或者修正系数, 最大化地降低离散系数改变对 B 基准值计算带来的影响<sup>[6]</sup>。并且除了本文提到的两种方法计算 B 基准值以外, 国内外少数学者开始从统计学原理上进行创新, 设计了多种其他算法<sup>[6-7,20-21]</sup>, 针对不同材料体系进行验证, 也是未来 B 基准值研究发展的趋势。

(3) 目前单点法的理论及应用已经非常成熟, 很难在保证统计学原理的前提下继续对所需的样本量进行减少。而多样本环境法存在着仅限于符合正态分布样本、ADK 通过率低、合并环境要求

过于严苛、未通过环境合并的样本数量难以采用单点法计算等诸多问题, 严重地制约了其进一步的扩大应用。未来可借助大数据、机器学习等新技术, 将复合材料的制造工艺、环境条件等等均纳入计算考量中, 并将先进的复合材料 CAE 力学仿真实理论与 B 基准值计算手段相互结合, 并行发展, 使复合材料 B 基准值的计算更加的系统化、数字化、高效化。

## 参考文献:

- [1] SPENDLEY P R. Design allowables for composite aerospace structures[D]. Guildford: University of Surrey, 2012.
- [2] YURVIANY, TAMAZA D, WIDAGDO D, et al. Statistical analysis of CFRP mechanical properties using B-basis based on weibull and ANOVA distribution analysis[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 852(1): 012078.
- [3] HAN X L. Normalized B-basis of the space of trigonometric polynomials and curve design[J]. Applied Mathematics & Computation, 2015, 251: 336-348.
- [4] EKVAL J C, GRIFFIN C F. Design allowables for T300/5208 graphite/epoxy composite materials[J]. Journal of Aircraft, 1982, 19(8): 661-667.
- [5] 王思雍. T800级碳纤维/环氧树脂复合材料性能测试与B基准值计算研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
WANG Siyong. Study on mechanical properties and B-basis calculation of T800 carbon fiber reinforced epoxy resin composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020(in Chinese).
- [6] 郝新超. 基于Anderson-Darling检验的复合材料厚板层间拉伸强度性能研究及B基准值[J]. 材料导报, 2020, 34(S1): 480-485.  
HAO Xinchao. Interlaminar tensile strength behavior and B-basis value of thick laminates based on anderson-darling test[J]. Material Guide, 2020, 34(S1): 480-485(in Chinese).
- [7] 赵晖, 张立同, 张家鑫. 基于小样本物理测试的复合材料B基准值分析计算[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(4): 62-66, 74.  
ZHAO Hui, ZHANG Litong, ZHANG Jiabin. Composite material B-basis allowable simulation based on small sample physical tests[J]. FRP/Composite Materials, 2019(4): 62-66, 74(in Chinese).
- [8] 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.
- [9] ELIZABETH C. Hexcel 8552 IM7 unidirectional prepreg 190

- gsm & 35% RC qualification statistical analysis report[R]. USA: WichitaState University, National Institute for Aviation Research, 2012: 1-104.
- [10] ABUMERI G, HOUSNER J, GARG M, et al. Determination of composites A-and B-basis allowables with reduced testing[C]//The Society for the Advancement of Material and Process Engineering. California: 2011.
- [11] Federal Aviation Administration. Composite materials handbook-Volume 1. Polymer matrix composites: Guidelines for characterization of structural materials: MIL-HDBK-17-1F[S]. Washington: Federal Aviation Administration, 2002.
- [12] 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: Federal Aviation Administration, 2003.
- [13] 沈薇, 杨胜春, 沈真. 复合材料力学性能表征标准化研究新进展[J]. 航空制造技术, 2009(S1): 25-27, 29.  
SHEN Wei, YANG Shengchun, SHEN Zhen. New progress in standardization of mechanical properties characterization of composite materials[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2009(S1): 25-27, 29(in Chinese).
- [14] Society of Automotive Engineers International. Composite materials handbook-Volume 1: Polymer matrix composites: Guidelines for characterization of structural materials: CMH-17G[S]. Warrendale: SAE International, 2012.
- [15] 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(in Chinese).
- [16] WHITEHEAD R S, KAN H P, CORDERO R, et al. Certification testing methodology for composite structure[R]. Atlanta, 1986.
- [17] ZHANG Y, KIM N H, PALLIYAGURU U R, et al. Reduced allowable strength of composite laminate for unknown distribution due to limited tests [J]. Journal of Composite Materials, 2020, 54(21): 0021998320903781.
- [18] ZHANG Y, SCHUTTE J, MEEKER J, et al. Predicting B-basis allowable at untested points from experiments and simulations of plates with holes[C]//12th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Braunschweig, 2017.
- [19] 王艺. 航空材料性能设计许用值统计分析与软件开发[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.  
WANG Yi. Statistical analysis and software development of the allowable value for the performance design of aviation materials[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012(in Chinese).
- [20] 王翔, 陈新文, 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 Xiang, CHEN Xinwen, WANG Haipeng, et al. Statistic-based calculation methods B-basis value of composites[J]. Failure Analysis and Prevention, 2010, 5(4): 210-215(in Chinese).
- [21] 冯振宇, 刘星星, 魏书有, 等. 复合材料B基准值统计方法的对比分析[J]. 材料导报, 2012, 26(S2): 147-149.  
FENG Zhenyu, LIU Xingxing, WEI Shuyou, et al. The comparison of statistical analysis methods on composite B basis value[J]. Materials Review, 2012, 26(S2): 147-149(in Chinese).