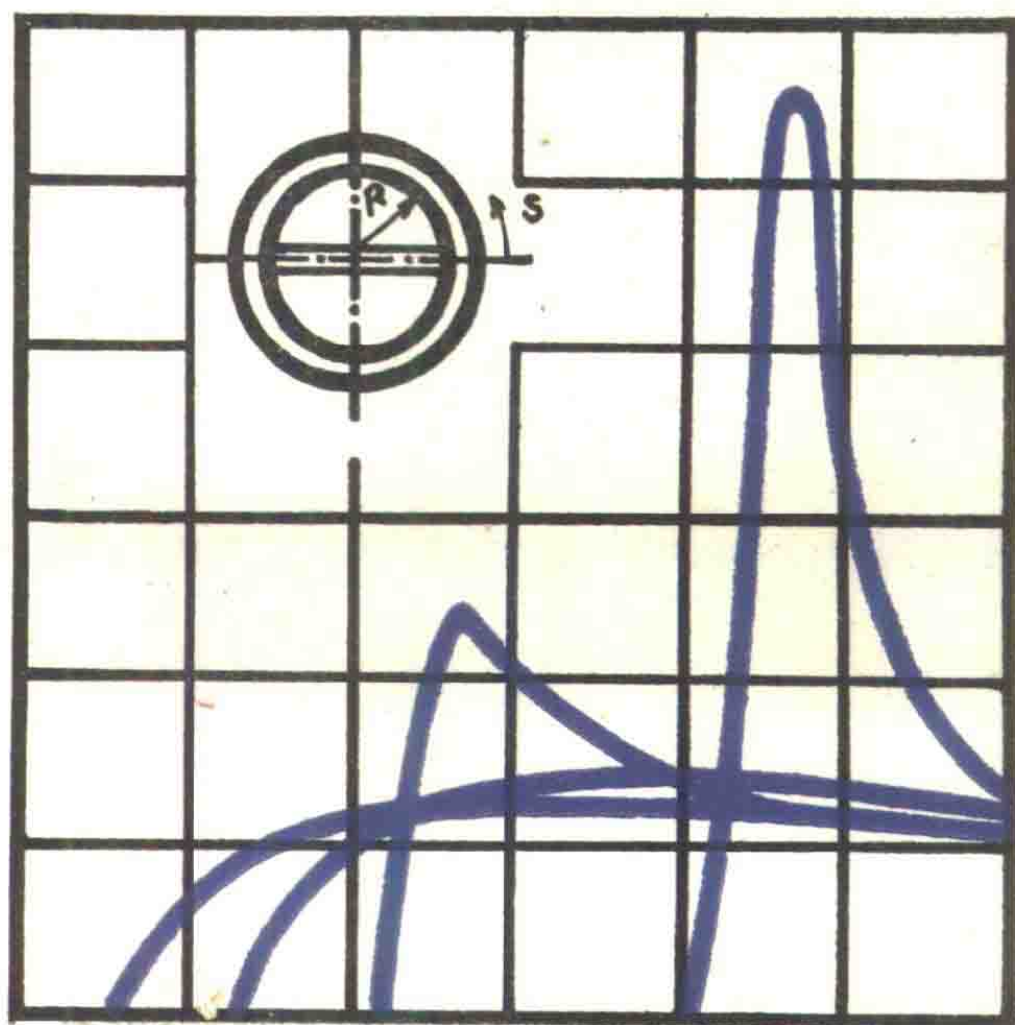


COMPOSITES

复合材料静载 性能试验方法

〔苏〕尤·姆·塔诺波尔斯基 等著

航空工业出版社



内 容 简 介

《复合材料静载性能试验方法》论述了玻璃纤维、碳纤维、硼纤维和有机纤维复合材料的拉伸、压缩、剪切、弯曲的强度和弹性性能的试验方法。试样形式有板状、杆状、环状和管状等。本书还阐明了影响试验结果的各种因素。

本书可供从事复合材料的研究、试验、设计、生产和应用的科技人员参考。

复合材料静载性能试验方法

〔苏〕尤·姆·塔诺波尔斯基等著

张国梁 译 理有亲 校

航空工业出版社出版发行

(北京和平里小关东里14号)

全国各地新华书店经售

北京市通县向阳印刷厂印刷

1988年12月第1版 1988年12月第1次印刷

787×1092毫米1/32 印张：12.125

印数：1—2500 字数：282千字

ISBN 7-80046-087-8/Z·024

定价：3.90元

目 录

中译本出版者的话	(1)
英译本序	(2)
作者为英译本写的序	(5)
绪言	(7)
符号	(10)
第一章 纤维复合材料	(14)
1.1. 复合材料	(14)
1.1.1. 纤维复合材料的形式	(14)
1.1.2. 试验特点	(19)
1.2. 纤维聚合物复合材料的各向异性	(20)
1.2.1. 分类	(20)
1.2.2. 各向同性材料和各向异性材料	(22)
1.2.3. 增强纤维的叠层形式	(23)
1.2.4. 向连续介质的转化	(25)
1.2.5. 圣维南(Saint Venant) 原理	(28)
1.3. 可测定的性能	(29)
1.3.1. 弹性常数	(29)
1.3.2. 弹性常数间的关系式	(30)
1.3.3. 强度	(32)
1.3.4. 温度和时间的影响	(33)
1.4. 试样	(33)
1.4.1. 一般要求	(33)
1.4.2. 尺寸效应和应力集中	(35)
1.4.3. 试样处理状态和试验条件	(36)

1.4.4.	静加载	(37)
1.4.5.	试验报告	(38)
1.5.	工艺因素的影响	(39)
1.5.1.	成形条件	(39)
1.5.2.	纤维的不直线度	(42)
1.5.3.	纤维的波纹度和张紧度	(42)
1.5.4.	初始应力及其试验测定	(45)
第二章	拉伸试验	(49)
2.1.	板状试样的拉伸	(49)
2.1.1.	引言	(49)
2.1.2.	应力-应变曲线	(50)
2.1.3.	测量的值	(55)
2.1.4.	破坏模式	(57)
2.1.5.	加载条件	(59)
2.2	试样的形状和尺寸	(62)
2.2.1.	一般要求	(62)
2.2.2.	变截面试样	(65)
2.2.3.	等截面试样	(68)
2.2.4.	夹层梁	(69)
2.3.	板状试样的加载	(70)
2.3.1.	各向异性杆的变形特征	(70)
2.3.2.	拉伸力的传递	(72)
2.3.3.	接头片	(75)
2.3.4.	试样的夹紧	(79)
2.3.5.	试样尺寸	(83)
2.4.	与增强纤维方向成一角度的加载	(88)
2.4.1.	试验的目的和说明	(88)
2.4.2.	试样宽度的选择	(88)
2.4.3.	利用绘图法处理试验结果	(90)

2.4.4.	用两组试样试验测定弹性常数	(94)
2.5.	层间拉伸强度	(96)
2.6.	环状试样的拉伸试验	(99)
2.6.1.	对开式拉力盘拉伸法	(99)
2.6.2.	柔性圆环加载法	(111)
2.6.3.	液静压加载法	(113)
第三章	压缩试验、管状试样试验、挤压试验	(115)
3.1.	板状试样的压缩	(115)
3.1.1.	基本关系	(115)
3.1.2.	变形特点	(116)
3.1.3.	破坏模式	(118)
3.1.4.	应变速率	(121)
3.2.	试样的形状和尺寸	(122)
3.2.1.	引言	(122)
3.2.2.	杆和直条试样	(123)
3.2.3.	变截面试样	(125)
3.2.4.	圆截面试样	(127)
3.2.5.	夹层梁	(129)
3.2.6.	试样标距的尺寸	(129)
3.3.	加载	(132)
3.3.1.	端面加载	(132)
3.3.2.	侧面加载	(135)
3.3.3.	联合加载	(139)
3.3.4.	防止屈曲的方法	(141)
3.4.	环状试样的压缩	(141)
3.5.	管状试样的试验	(147)
3.5.1.	轴向拉伸和压缩	(147)
3.5.2.	内压和外压加载试验	(157)
3.6.	挤压试验	(162)

3.6.1.	标准方法	(162)
3.6.2.	破坏图	(164)
第四章	剪切试验	(170)
4.1.	抗剪性能的研究方法	(170)
4.2.	薄壁管的扭转	(177)
4.3.	平板剪切	(182)
4.3.1.	加载方法	(182)
4.3.2.	试样的形状和尺寸	(192)
4.3.3.	弹性常数	(196)
4.3.4.	强度	(198)
4.4.	正方形平板的扭曲	(199)
4.4.1.	基本方法	(199)
4.4.2.	试样的尺寸	(204)
4.4.3.	弹性常数	(205)
4.4.4.	层间剪切强度	(208)
4.5.	各向异性直条试样的拉伸	(209)
4.6.	切槽试样的拉伸-压缩	(216)
4.6.1.	试样的尺寸和形状	(216)
4.6.2.	层间剪切模量	(224)
4.6.3.	层间剪切强度	(224)
4.7.	双向拉伸-压缩	(227)
4.8.	剪切(横向剪切)	(231)
4.9.	直杆的扭转	(233)
4.9.1.	试验特点	(233)
4.9.2.	扭转刚度	(234)
4.9.3.	剪切模量的测定	(236)
4.9.4.	层间剪切强度	(244)
4.9.5.	腰形试样的扭转	(249)
4.10.	环状试样的扭转	(251)

4.10.1. 试验目的和特征.....	(251)
4.10.2. 整环的扭转.....	(252)
4.10.3. 开口环的扭转.....	(255)
4.10.4. 试验技术.....	(258)
第五章 弯曲试验.....	(262)
5.1. 直轴线梁.....	(262)
5.1.1. 加载方法.....	(262)
5.1.2. 棱柱梁.....	(268)
5.1.3. 夹层梁.....	(271)
5.1.4. 加载条件, 测量值.....	(272)
5.1.5. 弯曲的破坏模式.....	(276)
5.2. 三点加载.....	(279)
5.2.1. 弯曲的工程理论.....	(279)
5.2.2. 弹性常数的测定.....	(282)
5.2.3. 支点处的滑移.....	(287)
5.2.4. 强度.....	(289)
5.3. 多点加载方法.....	(297)
5.3.1. 纯弯曲.....	(297)
5.3.2. 四点加载.....	(301)
5.3.3. 五点加载.....	(305)
5.4. 固支梁.....	(308)
5.5. 环状试样和弓形试样.....	(309)
5.5.1. 加载方法.....	(309)
5.5.2. 整环试样.....	(312)
5.5.3. 开口环试样.....	(318)
5.5.4. 弓形试样.....	(321)

参考文献

附录 树脂基复合材料(纤维增强塑料)静载性能试验方法的 中国标准(GB)一览表

中译本出版者的话

本书系根据英译本“*Static Test Methods for Composites*”(1985年版)译出的。在翻译过程中对照了俄文原版本(1981年版,第三版),将英译本中的误译和印刷错误作了改正。与俄文原本比较,英译本增加了个别新的试验方法,并作了一些修正。本书审校者王惠杰,责任编辑崔连信。

英 译 本 序

复合材料在研究和应用方面发展非常迅速，现在它不再是什么奇异的材料，而已成为一种实用的工程结构材料了。仅就飞机而言，复合材料的用量已经从占机体总重的2~3%增加到10~15%，在有些更先进的飞机结构上，复合材料的用量甚至高达40~60%。

为促进这类材料的应用，已设计制造出结构效率高，制造成本低而又耐用的零件，并预料会达到先前使用金属材料同样的水平，甚至更高。

在应用复合材料时，要确定类似于金属工业中所用的静载设计许用值，这就需要进行大量的试验。从复合材料的早期历史发现，其试验数据的离散度远大于金属的，这必然会大大降低所得到的数值。正如本书正文所述，引起这种离散性的原因，基本上是由于复合材料组分的性质、取向、工艺参数、各组分的相对比例和加工技术等有很大的不同。

我们可以毫不夸张地断言，从一块金属板上切下的一个试样，其强度几乎就代表该金属的强度。而对于复合材料，具体试样的强度则常常仅代表那个特定试样的强度，它与该复合材料最后产品的强度只是一般关系。

基于这种情况，就必须对最终零件作破坏试验，以证明设计的可靠性。这一情况又常使结构设计显得保守，从而大大降低了减重效果。

准确的强度数据是复合材料产品合理设计和经济制造的

基础。

苏联里加拉脱维亚科学院聚合物力学研究所的一个工程师与科学家小组，对所有能收集到的聚合物试验方面的文献进行了全面分析，并作了大量的补充试验予以充实，试图解决数据变化问题。这种研究的结果构成了本书的内容。书中对所有可验证的参数都进行了研究，并从文献中选用，或在研究所的同事帮助下，由作者推导或修改了获得设计数据所用的公式。这些公式连同来自世界各国的大量参考文献，包括报告、书籍、出版物和标准，一并提供给读者，以便在设计复合材料时选用。本书也讨论了所有工艺参数的影响，并从精度和可靠性方面对各种试验方法和试样作了说明和评价。

读过本书，你会感到大多数试验室所采用的试样制备方法和试验技术多么不完整和不充分。老的金属试验方法和较新的玻璃纤维复合材料试验技术是太不可靠了，不能用于现代复合材料，而必须引入和完善很多新方法。

在我自己的经验中，曾发现复合材料的很多早期数据是不可靠的。由不同的试验室鉴定材料时得到的数值，其离散度和变化量很大。本书作者并未对所有的问题给以完满的解答，但阐明了很多原来不清楚的参数，并在试验的选用和材料的控制方面提出了很多建议。

大多数复合材料或各向异性材料方面的书，都是论述基本设计概念和各向异性结构的弹性理论的，本书则提供了制订破坏试验计划、确定合适的参数以及校核试验结果等方面的资料。

在选择试样形状和制造工序时，要求材料、产品或结构的全部制造条件和方法完全相似。本书对生产中大部分较重要的和有影响的工艺参数都提出了建议。对各种形状的试样

的试验结果，也从最佳可靠性方面作了讨论和推荐。

涉及到的其它内容有尺寸效应、应力集中、试样状态和加载形式等。最后介绍了应作为试验报告一部分的全部资料目录。

乔治·卢宾

作者为英译本写的序

过去十年中，人类历史上首次出现了用工业化生产方法提供既定性能的先进材料的可能性。这一事实是同复合材料的产生、发展和改进密切联系的。当代对复合材料方面的技术要求推动着复合材料的进展。复合材料基于增强的概念——简单说来，就是材料性质相反的物体的联合：一种柔顺的基体和另一种强度与刚度很大的增强体的联合。

这一概念起源于自然界，但决不是一些很简单形式，如植物的茎和叶，人和野兽的骨骼；它们的性能犹如纤维增强的各向异性材料——复合材料。值得注意的是，增强体的概念要比强度或可加工性的概念广泛。它也包括材料可靠性的提高。显然，复合材料是使强度提高、断裂韧性也提高的唯一的材料。

与金属材料相反，复合材料的力学性能是用很多常数表征的。对它们的试验评价，存在着基本方法上的困难。应当注意，复合材料试验方法的标准化水平还很低。实际上，不同形状和尺寸的试样、不同试样的制造方法和试验技术都在使用，使得试验结果无法比较，而且造成对复合材料结构的潜力评价不一。因此需要对力学试验采取一种实际措施，对复合材料的强度和刚度评定方法以及试验数量制订严格的规范，促使对现行方法加以分析、评价和统一化。

本书在评价和选择先进复合材料的板状和环状试样的拉伸、压缩、剪切和弯曲等最有前途的静载性能试验方法时，依据了世界各国的经验，但主要是苏联和美国的经验。试验

方法的选择及其适用范围，是用大量的确凿材料加以证实的。大部分表格和插图附有所依据的参考著作。这些著作含有全部必要的补充资料。参考文献中的苏联科学出版物，对于美国读者来说是不太熟悉的。

本书的优缺点理应由读者去评定，这里仅想指出，苏联出版的俄文本全部三版都受到了专家和科学界的高度评价。美国出版的英文本是由伊尔格·A·奥奏琳娜、乌拉基米尔·Л·库拉柯夫和利莱·Л·沃洛金娜翻译的，作者非常谢感他们的努力。也要感谢王·诺斯川德·理郝尔特有限公司高级编辑苏珊·蒙格尔的帮助。还要很高兴地指出，美国版本是由复合材料力学和工艺的先驱者之一乔治·卢宾博士*推荐给读者的。新材料的问题是综合性问题，人类未来的进步在很大程度上依赖于它的解决。

尤·姆·塔诺波尔斯基
于苏联里加

* 乔治·卢宾在纤维增强塑料工业建立初期(30年代末)即从事复合材料工作，对复合材料成形工艺有卓越的贡献。他主编了《增强塑料手册》(1969年版)(中译本，中国建筑工业出版社，1975年出版)和新版的《复合材料手册》(1982年版)。一译者。

绪 言

为了估价强度和刚度，要对结构材料进行力学性能试验。试验结果得到实际应用的结构材料力学性能试验，在历史上可以追溯到1662年7月4日〔77〕，当时用这种试验方法来比较用里加纱线和荷兰纱线制造的缆绳强度〔137〕。从那时起，材料(主要是金属)试验方法已达到比较先进的水平。工程材料试验方法的发展史在文献〔235〕中作了详细的论述。在承受高载荷的主要结构中，复合材料的出现和扩大应用促使对力学试验课题加以修正。新的试验方法在不断地发展，现有的技术一直在受到验证和重新考察。复合材料试验的主要困难已在文献〔198〕中作了分析。

研究的试验方法远超过现有试验标准所规定的方法。迄今仅有很少的标准是针对各向异性材料制订的。对复合材料所作的许多研究，由于采用了不同的试验技术，促使对这种材料的潜力必须加以分析判断、评价和统一化。

单向的、层压的和多向的增强纤维先进复合材料是非均质的、基本上各向异性的材料。对于这类材料，常用术语——拉伸试验、压缩试验、剪切试验和弯曲试验，如不规定载荷相对材料弹性对称轴的方向，则是毫无意义的。材料的各向异性和结构特性引起了一系列问题。首要的是，为完全描述这一材料所需测定的强度和弹性性能的数目，取决于材料各向异性的类型。加载方式的选择(使材料性能同试验测定值最直接有关)、处理试验数据用的分析工具的选择以及对试验结果有效程度的估计等也都有十分重要的意义。

对于纤维复合材料，很难在试样的性能测定区体积内建立均匀的应力状态，甚至对于最简单形式的试验也如此。随着材料的各向异性增加（即具有高模量和高强度增强纤维的材料，如硼纤维、碳纤维和有机纤维增强的复合材料），这种困难也在增加。复合材料试验中测量的应变，基本上取决于边界条件，即取决于试样的夹紧方法和加载方法。这种现象是高各向异性材料的一种特性，相当于圣维南（Saint Venant）原理的一种特殊情况。

弹性性能的各向异性提高了对试样形状和尺寸的确定、端头效应的消除（适当选择夹头到试样标距段的距离）、载荷的传递、纤维的取向和试样的切割角度的选取等方面的要求。若加载方式和试样的夹紧方法选择不当，强度的各向异性会导致破坏模式的改变，例如导致夹头中的试样受拉，产生分层或“剪开”。试样宽度的选择是个特殊问题；重要的是应避免任何边缘效应，即避免出现危险的层间应力。

本书提供了在正常条件下纤维聚合物复合材料经短时静载性能试验，以评定强度和弹性性能的方法。作者曾系统综合整理了这方面世界上的各种经验，充分利用了近年公布的综述文献〔27、38、39、45、194、244、266〕、苏联拉脱维亚科学院聚合物力学研究所积累的经验，以及美国材料和试验学会（ASTM）专门会议中印发的各种专集和报告〔10，46～51〕。本书的文献目录不敢妄称全面，但也足以反映纤维复合材料力学试验的目前水平、这一领域的进展以及所达到的标准化程度。

尽管进展很快，但各种方法的掌握程度和标准化是有差别的。如前所述，对于剪切刚度，特别是对于剪切强度的测定是有困难的。随着经验的积累，评定强度和刚度的很多方

法需要进一步修正。

最近几年，环状试样的试验方法已大大推广，使我们能用共同的观点——根据加载形式来考虑板状和环状试样的拉伸、压缩、剪切和弯曲等试验方法。全部章节包括了用碳纤维、硼纤维和有机纤维等各种方式增强的先进复合材料的试验方法和试验技术。但注意力集中在可作为单张层片验证的单向材料上。测定单张层片的性能，不仅是为了对这种材料作工程鉴定，它也是确定混杂纤维复合材料和具有数量不等的横向增强纤维叠层的复合材料性能的基础。

在本书讨论的复合材料中，连续纤维多向增强的层压玻璃纤维复合材料占有最重要的地位。但实际上没有给出用以验证玻璃纤维复合材料试验方法的试验数据。这些试验方法是各种各样的，并且精度很高。对于用传统增强结构的玻璃纤维复合材料，也没有必要对选用的试样形状和尺寸以及加载方式等加以鉴定和试验验证。对于高模量复合材料则给出了必要的试验数据，因为这种复合材料的很多问题仍在研究中。多向增强的高模量复合材料试验技术尚不成熟。

本书依据的是以聚合物为基体、用普通的和高模量的纤维增强的、单向和多向的第一代层压纤维复合材料的试验经验。经验表明，研究得出的方法也可能应用到下一代纤维复合材料——碳、金属和陶瓷等作基体的材料上。但是，聚合物复合材料的试验经验，如不适当考虑新一代材料的特性，是不能直接应用到这些新材料上的。

在专门分析各种具体试验的每一章末尾，都有一综合表（见第3、4和5章）。这些表格便于快速查阅各试验形式的排列位置，便于了解最佳试验方法的选择及对其潜力的主要评价。需要掌握复合材料在单向的静载性能的知识，但为了在

主要结构中合理采用复合材料，这常常又是不够的。在复杂应力状态下，发展纤维复合材料性能的研究方法是一项困难的任务。这需要系统地和综合地研究复合材料的长时静载性能、动载性能和疲劳性能的破坏方法以及非破坏方法的系统化和综合化。这些问题还需考虑到高、低温条件、高湿条件和特殊的试验环境条件，尤其需要特别注意试验的预测方法。所有上述问题的解决，将形成国际范围的复合材料试验方法进一步标准化的科学基础。

在前两版的准备中，*A. K. 马洛梅斯特斯*给作者很大帮助。他在看完本书的提纲和手稿后提出的建议和评论，对这一工作的成功有重大作用。作者真诚地感谢 *M. Γ. 吉岗*通过分析和试验评定了高模量多向增强复合材料的一系列试验方法。也要感谢 *Л. Л. 沃尔金娜*为手稿打字并准备了全部三版的插图。

符 号

坐标

x, y, z	直角坐标系结构轴
θ, φ, r	极坐标系结构轴
$1, 2, 3$	直角坐标系或极坐标系材料轴。
	本书中涉及的大部分情况，它们尽量同直角坐标系或极坐标系结构轴重合。

几何特征

b, l, h	正文中解释用的试样特征线性尺寸
r	现行半径