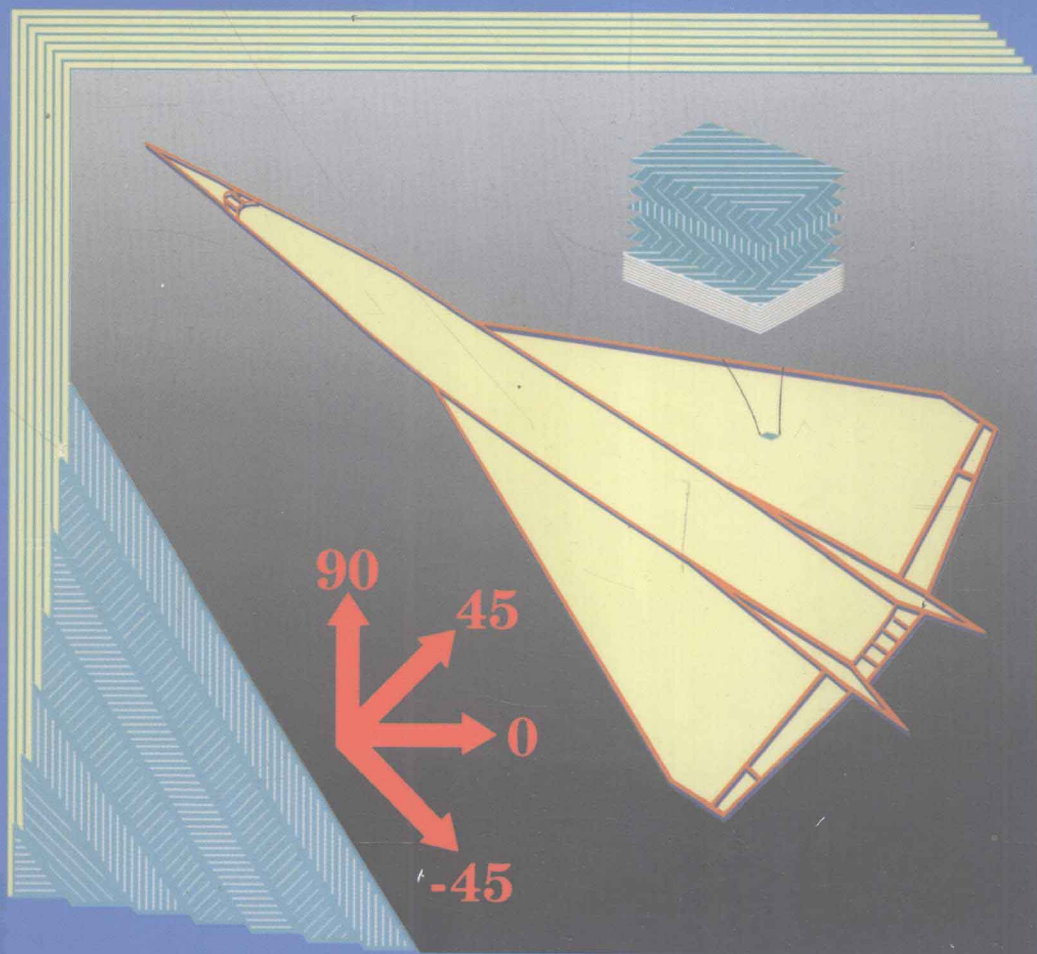




(美) 牛春匀 (Michael C. Y. Niu) 著/审
程小全 张纪奎 译

COMPOSITE AIRFRAME STRUCTURES

实用飞机复合材料 结构与制造



航空工业出版社



实用飞机复合材料结构 设计与制造

(美) 牛春匀 (Michael C. Y. Niu) 著/审

程小全 张纪奎 译

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书围绕飞机复合材料结构与制造技术,从结构选材、模具设计、制造工艺、连接设计与分析、环境考虑、层合板的设计方法、结构试验、质量保证、结构修理和创新设计等进行了全面系统的阐述,并结合美国波音、洛克希德和欧洲空客等飞机公司的设计实例,介绍了先进飞机复合材料结构设计、制造与试验验证的具体方法和实际经验。其内容对于大型飞机和先进战斗机复合材料结构工程设计具有直接的指导作用。此外,本书中译本还专门增加了最新的有关复合材料结构 FAA 适航认证要求和最近提出的结构创新设计思想等内容,这对于我国大型飞机将来申请美国的适航认证工作具有重要的指导意义。

本书可作为飞行器(含飞机、直升机和导弹、火箭等)设计研究所、航空材料与工艺研究所的研究人员,复合材料结构修理与维护人员,大专院校的教师和科研人员等的参考书,同时也可作为飞行器设计与飞行器结构力学学科方面的研究生的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

实用飞机复合材料结构与制造 / (美) 牛春匀著
; 程小全, 张纪奎译. -- 北京: 航空工业出版社,
2010. 11

ISBN 978 - 7 - 80243 - 633 - 6

I. ①实… II. ①牛…②程…③张… III. ①飞机—
航空材料: 复合材料—结构设计②飞机—制造 IV.
①V257②V262

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 208004 号

实用飞机复合材料结构与制造 Shiyong Feiji Fuhe Cailiao Jiegou Sheji yu Zhizao

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010 - 64815615 010 - 64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2010 年 11 月第 1 版

2010 年 11 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 37.25

字数: 948 千字

印数: 1—3000

定价: 180.00 元

中文版序

作者曾在美国洛克希德公司的复合材料结构发展部门工作了 20 年，累积了不少这方面的实际工作经验。后来，把这些经验及知识写成了一本英文书 COMPOSITE AIRFRAME STRUCTURES，并于 1992 年在香港出版。出版后受到了世界上复合材料飞机结构界的广泛欢迎及应用，迄今已销售 1 万余册。作者觉得将来的飞机结构，很大部分将采用复合材料来减轻重量，从而节省燃油；在将来油价高涨之际，这是最好的选择。由于没有腐蚀问题，在维护方面又可节省一大笔开销。这种情形，在目前的商用飞机波音 787 与 A350XWB 上得到反映，这两大飞机的结构大量采用复合材料，占 50% 以上，由此可以看出复合材料用量增大的必然性。

任何材料必定有其优缺点，但必须了解其特性，才能防范或改进其缺点。复合材料最大的弱点是脆性及雷击，尤以在飞机机翼油箱区。由于复合材料结构在设计方面的资料不像铝合金那样充分，因此，必须做大量的各种试验来验证结构的完整性，去满足“适航条例”和“认证”的要求。

此书对材料选择至制造成品的整个过程，都有一系列的详细介绍，包括材料、模具、制造、连接、环境、层合板设计、结构试验、质量保证、修理等。但对于结构应力分析方面的内容不在本书详细介绍范围内，只是做一般性的阐述，主要是提醒读者进行应力分析时应注意哪些事项。

在本书的末尾，介绍了一些目前复合材料结构的应用情况。除了在第 12 章中已介绍的一些创新设计概念外，在本书中增加了 12.7 节“绿色飞机结构”的设计新概念。此外，还增加了三个附录，即附录 D：复合材料飞机结构适航认证简介，附录 E：波音 787（梦幻飞机）简介，附录 F：A350XWB 简介，让读者共同分享这些宝贵的信息。

本书承蒙北京航空航天大学飞机设计研究所程小全教授负责译成中文，航空工业出版社在国内出版发行，让中国读者有机会分享到复合材料结构设计与制造方面的技术与实例，为中国航空工业提供一些宝贵经验，特此致谢！

 谨上

于美国洛杉矶
2010 年 10 月

作者简介

牛春匀教授一直从事金属和复合材料飞机结构研究及咨询工作，曾是洛克希德航空系统公司的高级研发主管工程师，现任（美国）AD飞机结构咨询公司总经理。

牛教授在航天器结构和飞机结构的分析与设计方面有30多年的工作经验。在洛克希德，曾任部门主任和规划主任，负责结构布置与各种结构计划工作，其中包括金属和复合材料创新结构设计，这些结构可用在现在和（或）将来的先进战斗机和先进运输机上。在洛克希德工作期间，他深入参与初步设计各个方面的工作，其中包括飞机总体布局、结构布置、结构形式选择以及适航等内容。他是L-1011的主任工程师，负责机翼和尾翼的应力分析工作。他还于1966年和1968年，在波音公司先后做过波音727和波音747两架飞机的应力分析工程师。

牛教授的主要著作有三部：AIRFRAME STRUCTURAL DESIGN（1988），COMPOSITE AIRFRAME STRUCTURES（1992）以及AIRFRAME STRESS ANALYSIS AND SIZING（1997）。此外，他还编写了洛克希德复合材料设计指南和复合材料制图手册。他先后于1973年和1986年获得洛克希德成就奖和成果卓越奖，并在1973年列入Who's Who航空专家名录。

牛教授是北京航空航天大学顾问教授，以及南京航空航天大学、西北工业大学和沈阳航空航天大学的客座教授。

牛教授在洛杉矶加州大学讲授“飞机结构与修理”、“复合材料飞机结构”以及“飞机结构应力分析与尺寸布置”等工程短训课程。

牛教授1962年毕业于中国台湾中原大学土木工程专业，获学士学位；1966年在美国怀俄明大学获土木工程专业硕士学位。

译者序言

牛教授有三部主要的英文著作，分别是 AIRFRAME STRUCTURAL DESIGN (1988) (绿皮)，COMPOSITE AIRFRAME STRUCTURES (1992) (蓝皮) 以及 AIRFRAME STRESS ANALYSIS AND SIZING (1997) (红皮)。这些著作在国际航空界具有广泛而深远的影响，被国际上主要飞机公司的结构设计人员称为“案头工具书”。本书原著是其中的第二部。书中给出的复合材料结构设计、制造、检验和修理方法大都是以前人的经验和试验数据为基础，结合作者多年飞机复合材料结构设计工程经验总结提炼而成，具有极强的工程实用性，因此受到了复合材料结构设计人员的青睐。

原著自 1992 年问世以来，在香港 CONMILIT 出版公司先后出版了两版六次印刷，可见该书在国际上的影响是非常大的。本书根据牛教授最新修订的书稿翻译而成，这次修订后的内容将成为英文第三版的书稿。全书涉及飞机复合材料结构与制造的所有重要方面，其中一些名词术语与原文新增内容为首次译成中文，对我国飞机复合材料结构工程设计必将具有重要的工程价值。现在正值我国大型飞机项目进入工程设计阶段，相信本书及已经出版的其他两部著作对我国航空事业的发展会起到积极的推动作用。

在翻译过程中，译者主要参考了 2008 年 10 月出版的《实用飞机结构工程设计》一书。对于中文中暂时没有对应的专业词汇与术语，译者与牛教授进行了认真的讨论，再三斟酌后确定中文的用词。应译者的邀请，牛教授欣然担当起本书的审校工作。他在百忙之中抽空审阅了全书译稿，并提出了许多重要的修改意见；对于译稿的讨论是在牛教授打给译者的越洋电话中完成的。在与牛教授的交流过程中，译者不仅学到了更多新的知识，而且再次为牛教授严谨负

责的治学精神所感动。

译者在牛教授三部著作的翻译过程和自己的亲身体会中，也体会到本书“作者感言”中所说的“墨菲法则”也可在我国飞机结构设计领域同样发生作用。工程经验应该受到重视，前人的工作经验应以传承。希望本书以及牛教授的其他两部著作，能够让人们真正认识到这一点，重视前人经验的积累，并很好地加以利用。

全书的翻译工作主要由程小全、张纪奎完成，并且由程小全负责统稿。其中张纪奎负责第9、10、11章和第12章前6节以及附录A、B、C的翻译，其余内容全部由程小全翻译。在翻译过程中，高宇剑、张刚锋、李钟海、范舟、马志阳、康忻蒙、龙先飞等人参加了部分初译和图文整理工作，对他们的辛勤付出表示诚挚感谢。

本书的出版得到了航空工业出版社的大力支持，史晋蕾、李苏楠和邵箭编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动，在此表示衷心感谢。

由于译者水平有限，时间又比较仓促，翻译过程中难免存在错误或疏漏之处，衷心希望读者批评指正。

程小全

2010年10月于北京

作者感言

宇宙中充满了阴（负的）和阳（正的）的平衡。这可能有助于解释工业革命在给人类带来文明（正的）的同时，也对我们造成了污染（负的）——如果得不到有效的控制将是人类的灾难。在这个世界上存在着许多这种需要平衡的事例，而其结果则完全要看在时间还不是太迟之前我们如何处理它们。在事情发展的早期阶段把问题搞清楚，将会使其在后面更加容易处理，并且费用相应也会少很多。

20世纪70年代开始应用的电子计算机所带来的计算技术的革命，给工程技术人员带来了快速且精确的分析结果。计算机甚至能解决一些高超静定结构的问题，而在过去这是不可能做到的。不久的将来，计算机有可能会取代所有的人工计算。计算机（包括硬件和软件）的价值是无可争议的，然而，墨菲法则（Murphy's Law）常常到处发生作用，在结构设计领域里也不例外。一个工程师，他只知道如何给计算机输入信息，但有可能不清楚所得到的计算结果正确与否。（这是一个输入垃圾到输出垃圾的过程！）工程师不是机器，创新来源于工程师。非常遗憾，工业界出于对成本的考虑，而漠视工程师的实际经验。然而，计算机无法让工程师得到有价值的经验，它只是一个美妙的工具，并不能代替一切！

其次，谈谈有关工作经验。现在工程师花费大量的时间在计算机屏幕前，而忽视了不同学科同事（即小组工作）之间交流的重要性。工程师正在失去从“老手”那里获得必要经验的机会。最终的结果是工业界渐渐丢失了最有价值的经验，这些经验随着退休工程师的离世而消失。工业界应该要求工程师在他们退休之前，以报告的形式写下他们有价值的经验，这样就可以将其传给后来的人。虽然大公司拥有他们自己的手册、指南等供工作人员使用，但是，它们仅仅只是手册，而不能提供足够的经验。工业管理花费太多的努力在计算如何节约成本上，然而从长远来看，失去了宝贵的经验，最终则会导致很大的

损失。如果这种情形不能马上得到补救，那么飞机制造和其他工业将出现反冲效应。

与当代飞机工业相关的另一件事。自从“阿洛哈航线”(Aloha Airlines)一架老的波音 737 飞机失事后，这件事就一直在引起人们的争论，但是，至今没有人，包括飞机制造商和用户，想要给飞机定一个更适当的飞行寿命，如限制使用飞行小时数和服役年限等。从结构设计人员的观点来看，大家都认识到任何金属结构就像人体一样，都有其自己的疲劳寿命，没有一个寿命是永久的，即使维护工作做得非常认真小心。一架飞行器如果太老，再优良的维护也没有用。飞机与地面交通工具不同，如果飞机在空中有问题，它不可能停在那里等着援救，而肯定会掉下来。飞机制造商和政府认证机构的最高目标应该是为飞机确定一套合理的，并且合乎经济效用的寿命周期标准，以降低乘客的危险。这件事情现在就应该做，不要等着失去更多的生命后才觉醒！

李春司

英文第 3 版前言

本书第 3 版是在第 2 版基础上，除了增加 12.7 节“绿色飞机结构”以外，其余章节的内容基本不变。此外，在本书的最后还增加了 3 个附录，供读者参考，即附录 D：复合材料飞机结构适航认证简介，附录 E：波音 787（梦幻飞机）简介，附录 F：A350XWB 简介。

在附录 D 中，编辑了许多有关复合材料飞机结构认证的文件和资料。其中，FAR23.573 (a) 中的适航标准用来认证通用、多用途、特技和通勤类飞机；FAA 咨询通报 AC20-107B（2009 年 9 月出版）适用于民用复合材料飞机结构的认证要求，该咨询通报对于 FAR 25（运输类飞机适航认证标准）中民用运输飞机的认证也很重要。

附录 E 对波音 787 复合材料飞机结构进行了简要介绍。波音 787 复合材料的用量超过了 50%，并采用了先进制造技术制造复合材料机身、机翼和水平尾翼主翼盒等结构。机身采用单向带缠绕工艺制成独立的几段，其蒙皮为变厚度实心层合板，最终，这些机身段通过机械紧固件沿周向连接在一起。机翼翼盒上、下蒙皮壁板由整体层合板蒙皮与 I 形桁条胶结而成。水平尾翼翼盒与大型运输机尾翼翼盒结构常规的多肋设计不同，它采用了多梁共固化的结构形式。

附录 F 对空客 A350XWB（XWB 意思是超宽体机身）进行了简要介绍。该飞机比波音 787 的机身宽 8in，为了减轻结构重量，其结构使用了超过 50% 的复合材料。A350XWB 机身蒙皮分成 4 块壁板（两块侧壁板、一块上壁板和一块下壁板）制造，然后通过铝-锂隔框将它们连接在一起。机翼翼盒采用了两根复合材料梁和复合材料蒙皮壁板，翼肋为铝-锂合金机加件。

这三个新增附录中的所有数据仅作为资料供读者参考，实际情况应该参考适航认证当局和（或）飞机制造公司提供的最新数据。

北京航空航天大学飞机设计研究所程小全教授对本书第3版进行了全文审阅，并提出了宝贵意见，在此对程教授表示诚挚的感谢。

牛春匀
美国加利福尼亚洛杉矶
2010年7月

英文版前言

在过去几十年里，先进复合材料技术取得了巨大的进步，然而，复合材料在设计、制造，特别是应用方面的潜能并没有得到完全发挥，复合材料在承受大载荷主承力结构上的应用仍然受到一定的限制，究其原因，主要是因为缺乏经验的传承与信心。本书重点阐述了复合材料飞机结构与制造方面的技术与经验，希望能够帮助工程技术人员增进对先进复合材料技术的理解和对实际经验的掌握。复合材料结构设计所有重要的方面都将在本书进行详细认真的讨论，包括设计指南、观察、设计因素、设计实例的优点和缺点以及解决问题等。这里对材料的基本化学性能或层合板的强度（应力）分析不进行详细讨论，因为这方面的资料在许多有关复合材料的著作和发表的论文中都可以查找得到。

本书（可用作手册）分为 12 章，其中给出了许多重要的表格、图片、报道，以及大家感兴趣问题的阐释。随着技术的进步，书中所述的一些设计概念和制造工艺可能须要适当地加以修正，一些数据和资料可能也须要进行更改，但其中基本的数据和资料应该是适用的。本书的目的是为复合材料设计人员和工程师提供一套实用的设计工具，包括从过去复合材料结构设计和制造中所获得的经验与教训，以便能设计出成本低、重量轻、整体性高的高效复合材料结构。

复合材料结构不是其对应金属件的延伸，不能只认为是利用低密度材料零件逐个替代原来的金属零件（“黑色铝”方法）来减轻结构的重量。设计人员须要利用其聪明才智提出创新的设计概念与方法，才能实现有效使用复合材料结构的最终目标，即满足耐久性、损伤容限、可维护性、可修理性、适坠性、重量轻以及成本效益高等要求。

在复合材料结构设计中，事先考虑生产可行性方面的每一个工作协调界面并取得他们的支持极其重要，这是将来制造出高效益结构的保证。工程设计也应该从模具设计、生产制造、工业工程以及质量保证等方面寻找关系与准则。

在复合材料结构设计过程中，建议在应用复合材料设计指南时，将过去对应金属结构的设计经验结合进去。复合材料飞机结构设计包含了几乎所有的工程学科，因此，对于现今习惯于利用计算机进行计算分析和制图的工程师们来说，更需要从前人那里继承技术可靠、设计和分析合理的经验与数据；本书的编写充分考虑了这一需求。然而，要把所有的资料和数据都编入本书中是不现实的，为此，在每一章的后面选编了一些相关的参考资料，以便读者可以就自己感兴趣的问题进行更详尽的探讨。

在本书编写准备过程中，需要从许多渠道收集大量的资料和数据。在此作者衷心感谢我以前在洛克希德航空系统公司工作期间的同仁和其他公司专家的鼎力相助。特别感谢波音公司波音 777 尾翼结构项目主管 John T. Quinlivan 博士，他对本书全文进行了审阅，并提出了宝贵的意见。

虽然作者已经竭尽全力，希望本书能在飞机结构领域得到实际应用，但书中可能还是会有一些不尽人意之处。对于书中存在的问题，希望得到读者的批评指正。读者所提出的任何建议或意见对于本书的修订或改版都有益处，为此，作者将不胜感激。

牛春匀
美国加利福尼亚洛杉矶
1992 年 1 月

名词术语

A

胶结件 (adherend) 通过胶黏剂胶结的材料。

黏性 (adhesion) 用于表征抵抗分层能力的一种材料特性。

黏结剂 (adhesive) 可将两个表面黏结固定在一起的一种物质。在复合材料中用来特指能够传递较大载荷的结构胶黏剂。

黏结破坏 (adhesive failure) 胶黏剂与黏合体界面发生破坏。

老化 (aging) 材料暴露于自然环境一段时间后对材料性能的影响。

无定形 (amorphous) 无结晶度的材料，如液体，其分子的分布没有一定的次序或形状。

滞弹性 (anelasticity) 某些特定材料所显示的一种特性，其应变不仅是其应力的函数，而且是时间的函数。在不考虑永久变形的情况下，无论加载还是卸载，建立材料的应力—应变关系时都需要把时间的因素考虑进去。

各向异性 (anisotropic) 非各向同性，材料的力学和/或物理性能随参考坐标的取向不同而变化。

退火 (annealing) 为了降低塑料制品的内应力，将制品加热到某一适当的温度，其分子可以发生很大的运动，进而能够重新排列。

芳纶 (aramid) 由聚酰胺（尼龙）衍生，并且引入了芳环结构的一种高取向有机材料。

面密度 (areal weight) 单向带或织物单位面积（长×宽）的纤维质量（mass）。

人工气候老化 (artificial weathering) 材料暴露于人工模拟的实验室条件下，以便获得加速老化的效果，其中包括不同区域的温度、相对湿度、辐射能以及其他大气元素的变化。该条件可能具有周期性。

热压罐 (autoclave) 用于给其内部物件，如袋装层合板加压的一种封闭容器。其加压的介质是一种气体（通常使用氮气或二氧化碳）。“水压罐”（hydroclave）也是一种热压罐，它使用水来作为加压介质。

热压罐成形 (autoclave molding) 一种成形工艺，制件用压力袋覆盖好之后放入热压罐中，然后对其进行加热、加压固化。压力袋通常要通过排气管向外面排出气体。

B

B - 阶段 (b-stage) 树脂固化反应的中间阶段，树脂部分固化。

装袋 (bagging) 用不透气薄膜覆盖住制件，并将其边缘密封，以便袋内抽成真空。这层薄膜使外面的加压介质（热压罐或水压罐通常为空气或水）与袋内制件之间存在压差，以实现给制件施加压力。

均衡层合板 (balanced laminate) 0° 和 90° 以外的所有角铺层都成对出现 (但不一定彼此相邻) 的对称层合板。参见**对称层合板** (symmetrical laminate)。

隔膜 (barrier film) 固化过程中允许空气和挥发物排出, 却能阻止树脂流失的一种薄膜。

批料 (batch 或 lot) 通常是指用相同工艺方法生产, 且性能完全相同的一批材料。对于复合材料, 预浸料批次指的是用同一型号的纤维增强体浸渍同一批次基体制成的预浸料, 它不要求一次内完成同一批次的所有生产, 但是必须保证后续的生产是在同一条件下用相同的设备来完成。在本书中, 同一批丝仅仅指的是取得型号规格证的可用长丝。

黏合剂 (binder) 在模塑制件制造过程中, 用来将丝束黏合在一起使其组成铺层或预制品的一种黏结树脂。

双马来酰亚胺 (bismaleimides, BMI) 具有较低热容性的加成聚酰亚胺树脂体系, 具有与环氧树脂成形相似的工艺特性, 但其热稳定性比环氧树脂高很多。

吸胶布 (bleeder cloth) 在复合材料制件固化过程中, 既能让空气通过又能吸出多余树脂的一种材料, 如玻璃纤维。吸胶布不是制件的一部分, 因此在固化过程结束后将被去除掉。

胶结 (bond) 利用或不用胶黏剂将被粘物表面连接在一起的过程。

编织 (braiding) 将纤维直接织成一定的立体形状替代平面织物的铺贴或缠绕。这项技术现在用于制造石墨纤维增强的高尔夫球杆, 也可用来制造航天飞行器的管状结构。

透气布 (breather cloth) 一层或多层疏松的编织布, 在固化过程中放在真空袋内作为真空通道, 以利排除挥发物和空气。

架桥 (bridging) 想办法把纤维导入圆角和倒角处, 否则纤维会直接通过间隙而导致尺寸控制问题, 并出现空隙。必须注意防止分离层、吸胶层、隔膜、排气层以及装袋出现架桥。

脆性 (brittle) 绝大部分高性能树脂体系都是脆性的, 它们的延展性很低, 破坏前几乎不发生塑性变形。由于复合材料的纤维与树脂热膨胀系数不匹配, 如果树脂是脆性的, 那么在基体内通常会出现微裂纹。

宽带织物 (broadgoods) 宽度在 12 in 以上预浸料的总称, 供应商通常以连续卷筒形式供货。现在该词既指校直单向带预浸料, 也用来指编织布预浸料。

屈曲 (复合材料) (buckling composite) 屈曲是一种破坏模式。其特征是, 在压缩或剪切载荷作用下的结构发生不稳定的横向变形。在复合材料中, 屈曲既用来指常规的结构失稳或局部失稳, 又用来指纤维的细观失稳。

C

C 扫描 (C-scan) 利用超声波扫描试件的一种无损检测技术, 用来检测空隙、分层和纤维缺陷分布等。

碳 (carbon) 为所有有机聚合物提供骨架的一种元素。石墨是一种晶体排列更有序的碳, 钻石是晶体密集的碳。绝大部分高强“石墨”纤维实际上就是碳纤维; 经过高温处理, 有机先驱纤维可以转化为具有高模量的石墨化形式。

碳纤维 (carbon fibers) 先驱体经氧化和碳化而做成的纤维, 该纤维没有石墨化结构。

催化剂 (catalyst) 一种能加快反应速度而本身不会变成反应物分子结构一部分的化学物质。在树脂体系中, 催化剂 (和促进剂) 能降低反应温度, 影响反应速度, 并改变固化周期特性。

均压板 (caul plates) 无表面缺陷的光滑板, 在固化过程中用来给层合板制品提供控制表面。

赛拉尼斯压缩 (Celanese compression) 利用赛拉尼斯公司设计的夹具进行的一种专门的压缩试验, 现在已经是 ASTM 标准试验。

陶瓷模具 (ceramic tooling) 用可浇铸陶瓷制成的工装。除非需要生产大量复杂的制品, 否则陶瓷工装很少使用, 因为其他工装, 如石墨工装, 具有更好的经济性。

色谱 (chromatogram) 检测仪器的响应对溶液 (洗出液) 峰值体积的曲线, 其中的溶液是由已被分离出来的每一种成分所构成的系统。

布 (cloth) 由连续的纤维纱或纤维束制成的编织产品。“布”和“织物布”通常可以互换使用。

共固化 (cocuring) 在同一固化过程中复合材料层合板不仅完成自身固化, 同时还胶结固化到其他制件表面上的工艺方法。

热膨胀系数 (coefficient of thermal expansion) 温度升高 1°F ($^{\circ}\text{C}$) 所产生的单位尺寸的变化量, 用比率表示, 其常用单位是 $\text{in}/\text{in} \cdot ^{\circ}\text{F} \times 10^{-6}$ 和 $\text{in}/\text{in} \cdot ^{\circ}\text{C} \times 10^{-6}$ 。高模量石墨纤维沿轴向的热膨胀系数 (CTE) 为负值, 即纤维受热后收缩。CTE 表示的只是尺寸变化可逆的部分。

离散系数 (coefficient of variation) 标准偏差与均值的比值。

内聚破坏 (cohesive failure) 胶结连接的破坏面主要发生在胶层上的破坏现象。

复杂弯曲 (complex curvature) 在两个或两个以上的方向出现弯曲的曲面, 如鞍形面或球形面, 或者既有凹面区又有凸面区的曲面。

复合材料 (composite) 本书中常用的复合材料指的是用连续长丝增强的基体材料。

混合料 (compound) 一种或多种聚合物与其他成品所必需组分材料的混合物。

压缩模塑 (compression molding) 将增强后的树脂置入封闭的模腔内, 通过加压、加热使其固化的过程。

状态调节 (conditioning) 在试验之前, 将试件在规定的环境中保持一定时间的措施。

固结 (consolidation) 在金属基或热塑性复合材料中, 预浸铺层变成复合材料层合板成品的扩散黏结的过程。

连续长纤维纱 (continuous filament yarn) 连续的长丝丝束, 一般含有两股或两股以上的连续长丝。

龟裂 (crazing) 基体材料中大量微细裂纹扩展的现象。

纱线筒 (creel) 在纤维束缠绕过程中, 用作固定纱线筒的架子。它们被用来制作预浸带或编织机用的经向纤维束。

交联聚合 (crosslinking) 会形成三维网状分子结构的分子间化学反应。反应中至少要有一个分子会与其他三个或更多的分子形成反应聚合, 否则, 反应只会形成长分子 (链式

长分子)。

交叉铺设 (cross-plyed) 将具有不同方向的铺层铺贴在一起。编织布中虽然两个方向都有纤维,但不能称其为“交叉铺设”,只有当不同的铺层按不同的方向铺贴时才叫做交叉铺设。

结晶度 (crystallinity) 聚合物,如尼龙的分子链(以折叠等形式)或相邻分子准直排列的部分形成的局部结晶区域(高度有序的部分)。该区域会改变聚合物的物理性能。

固化 (cure) 通过化学反应使热固性树脂的性能发生不可逆转变化的过程。固化过程中可能使用固化剂,有可能还要用到催化剂、加热与加压。

固化周期 (cure cycle) 复合材料树脂或预浸料固化过程中的温度/压力随时间的变化过程。

固化监控 (cure monitoring) 使用电气技术检测固化过程中树脂分子的电性能变化和/或分子流动性。

固化应力 (cure stress) 复合材料固化过程中产生的残余内应力。这些应力是由组成复合材料的增强体和树脂之间热膨胀系数不同引起的。

D

挡条 (dam) 为防止固化期间层合板内的树脂流出和真空袋隆起而对其边界设置的支撑。

脱胶 (debond) 出于修理或重新加工的目的,而使胶结接头或铺层间发生界面分离的做法。

真空压实 (debulking) 通过加压和/或抽真空,将截留在叠层里的绝大部分空气排除,并使厚叠层压实。

分层 (delamination) 层合板中的一个或多个层间界面发生分离的现象。

旦 (尼尔) (denier) 纺织品术语,为9000m长的纤维纱的质量,重量(mass)单位为g。

解吸 (desorption) 从另一种材料上脱下被吸收材料的工艺。解吸与吸收(absorption)、吸附(adsorption)二者相反。

介电仪 (dielectrometry) 利用电气技术测量层合板中树脂在固化期间的介电损耗系数和电容变化的仪器。

差示扫描量热法 (differential scanning calorimetry, DSC) 树脂固化过程中吸收(吸热)或产生(升温)能量的测量方法。该方法也可用来测量溶剂与其他挥发物的排出量。

差热分析 (differential thermal analysis, DTA) 加热过程中,用来监控被测试件和参照物温度差的一项试验分析技术。通过该温度差可以获得相对热容量、溶剂、结构变化(例如,一种成分溶解在树脂内的相变)以及化学反应等信息。参见差示扫描量热法。

脱粘 (disbond) 胶结接头内黏结界面发生局部或大面积分离的现象。造成脱粘的因素很多,在固化或使用过程中都有可能发生脱粘。

损耗系数 (dissipation factor) 由电容器两板之间材料所引起的相位角滞后的度量,也叫功率系数,损耗正切值和正切值 δ 。在基体固化过程的电解质材料动力学分析中,它用来表示拥有恒定回流(交流)电场的树脂中,用于对准(或试图对准)双极子所耗能