



大飞机出版工程

总主编 顾诵芬

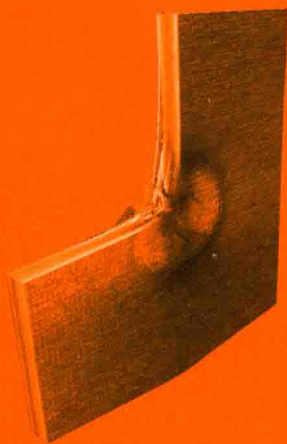
结构复合材料

Structural Composite Materials

【美】F. C. 坎贝尔 著

陈秀华 刘沛禹 杨 慧 等 译

蹇锡高 章 骏 李 强 等 校



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



大飞机出版工程

总主编 顾诵芬

结构复合材料

Structural Composite Materials

【美】F. C. 坎贝尔 著

陈秀华 刘沛禹 杨 慧 等 译

蹇锡高 章 骏 李 强 等 校



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书涵盖了先进复合材料的各个方面,包括材料的基本属性、制造方式、设计和分析方法以及材料在服役中的表现。本书涵盖了由热固性和热塑性聚合物、金属和陶瓷基体制成的连续和不连续纤维增强复合材料,重点介绍了连续纤维增强的聚合物基复合材料。本书由浅及深地介绍了复合材料的综合知识和目前最先进的复合材料技术,相比于理论知识,本书更加强调复合材料在实践方面的应用。

本书主要面向希望了解更多有关先进复合材料的技术人员,可作为设计师、结构工程师、材料和工艺工程师、制造工程师以及与复合材料相关的生产研究人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

结构复合材料 / (美) F.C. 坎贝尔著;陈秀华等

译. —上海:上海交通大学出版社, 2019

大飞机出版工程

ISBN 978-7-313-20558-2

I. ①结… II. ①F… ②陈… III. ①复合材料—研究

IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 276168 号

结构复合材料

著 者:【美】F. C. 坎贝尔

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

印 制:上海万卷印刷股份有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

字 数:751 千字

版 次:2019 年 6 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-20558-2/TB

定 价:368.00 元

译 者:陈秀华 刘沛禹 杨慧等

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:43.75

印 次:2019 年 6 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-56928178

大飞机出版工程

丛书编委会

总主编

顾诵芬（中国航空工业集团公司科技委原副主任、中国科学院和中国工程院院士）

副总主编

贺东风（中国商用飞机有限责任公司董事长）

林忠钦（上海交通大学校长、中国工程院院士）

编委会（按姓氏笔画排序）

王礼恒（中国航天科技集团公司科技委主任、中国工程院院士）

王宗光（上海交通大学原党委书记、教授）

刘 洪（上海交通大学航空航天学院副院长、教授）

任 和（中国商飞上海飞机客户服务公司副总工程师、教授）

李 明（中国航空工业集团沈阳飞机设计研究所科技委委员、中国工程院院士）

吴光辉（中国商用飞机有限责任公司副总经理、总设计师、中国工程院院士）

汪 海（上海市航空材料与结构检测中心主任、研究员）

张卫红（西北工业大学副校长、教授）

张新国（中国航空工业集团副总经理、研究员）

陈 勇（中国商用飞机有限责任公司工程总师、ARJ21 飞机总设计师、研究员）

陈迎春（中国商用飞机有限责任公司 CRJ29 飞机总设计师、研究员）

陈宗基（北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院教授）

陈懋章（北京航空航天大学能源与动力工程学院教授、中国工程院院士）

金德琨（中国航空工业集团公司原科技委委员、研究员）

赵越让（中国商用飞机有限责任公司总经理、研究员）

姜丽萍（中国商用飞机有限责任公司制造总师、研究员）

曹春晓（中国航空工业集团北京航空材料研究院研究员、中国工程院院士）

敬忠良（上海交通大学航空航天学院常务副院长、教授）

傅 山（上海交通大学电子信息与电气工程学院研究员）

总 序

国务院在 2007 年 2 月底批准了大型飞机研制重大科技专项正式立项,得到全国上下各方面的关注。“大型飞机”工程项目作为创新型国家的标志工程重新燃起我们国家和人民共同承载着“航空报国梦”的巨大热情。对于所有从事航空事业的工作者,这是历史赋予的使命和挑战。

1903 年 12 月 17 日,美国莱特兄弟制作的世界第一架有动力、可操纵、相对密度大于空气的载人飞行器试飞成功,标志着人类飞行的梦想变成了现实。飞机作为 20 世纪最重大的科技成果之一,是人类科技创新能力与工业化生产形式相结合的产物,也是现代科学技术的集大成者。军事和民生的需求促进了飞机迅速而不间断的发展和应用,体现了当代科学技术的最新成果;而航空领域的持续探索 and 不断创新,也为诸多学科的发展和相关技术的突破提供了强劲动力。航空工业已经成为知识密集、技术密集、高附加值、低消耗的产业。

从大型飞机工程项目开始论证到确定为《国家中长期科学和技术发展规划纲要》的十六个重大专项之一,直至立项通过,不仅使全国上下重视我国自主航空事业,而且使我们的人民、政府理解了我国航空事业半个多世纪发展的艰辛和成绩。大型飞机重大专项正式立项和启动使我们的民用航空进入新纪元。经过 50 多年的风雨历程,当今中国的航空工业已经步入了科学、理性的发展轨道。大型客机项目产业链长、辐射面宽、对国家综合实力带动性强,在国民经济发展和科学技术进步中发挥着重要作用,我国的航空工业迎来了新的发展机遇。

大型飞机的研制承载着中国几代航空人的梦想,在2016年造出与波音公司B737和空客公司A320改进型一样先进的“国产大飞机”已经成为每个航空人心中奋斗的目标。然而,大型飞机覆盖了机械、电子、材料、冶金、仪器仪表、化工等几乎所有工业门类,集成数学、空气动力学、材料学、人机工程学、自动控制学等多种学科,是一个复杂的科技创新系统。为了迎接新形势下理论、技术和工程等方面的严峻挑战,迫切需要引入、借鉴国外的优秀出版物和数据资料,总结、巩固我们的经验和成果,编著一套以“大飞机”为主题的丛书,借以推动服务“大飞机”作为推动服务整个航空科学的切入点,同时对于促进我国航空事业的发展和加快航空紧缺人才的培养,具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。

2008年5月,中国商用飞机有限公司成立之初,上海交通大学出版社就开始酝酿“大飞机出版工程”,这是一项非常适合“大飞机”研制工作时宜的事业。新中国第一位飞机设计宗师——徐舜寿同志在领导我们研制中国第一架喷气式歼击教练机——歼教1时,亲自撰写了《飞机性能及算法》,及时编译了第一部《英汉航空工程名词字典》,翻译出版了《飞机构造学》《飞机强度学》,从理论上保证了我们的飞机研制工作。我本人作为航空事业发展50多年的见证人,欣然接受上海交通大学出版社的邀请担任该丛书的主编,希望为我国的“大飞机”研制发展出一份力。出版社同时也邀请了王礼恒院士、金德琨研究员、吴光辉总设计师、陈迎春副总设计师等航空领域专家撰写专著、精选书目,承担翻译、审校等工作,以确保这套“大飞机”丛书具有高品质和重大的社会价值,为我国的大飞机研制以及学科发展提供参考和智力支持。

编著这套丛书,一是总结整理50多年来航空科学技术的重要成果及宝贵经验;二是优化航空专业技术教材体系,为飞机设计技术人员的培养提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的迫切需求;三是为大飞机研制提供有力的技术保障;四是将许多专家、教授、学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,旨在从系统性、完整性和实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的“大飞机”理论与实践相结合的知识体系。

“大飞机出版工程”丛书主要涵盖了总体气动、航空发动机、结构强度、航电、制造等专业方向,知识领域覆盖我国国产大飞机的关键技术。图书类别分为译著、专著、教材、工具书等几个模块;其内容既包括领域内专家们最先进的理论方法和技术成果,也包括来自飞机设计第一线的理论和实践成果。如:2009年出版的荷兰原福克飞机公司总师撰写的 *Aerodynamic Design of Transport Aircraft* (《运输类飞机的空气动力设计》);由美国堪萨斯大学2008年出版的 *Aircraft Propulsion* (《飞机推进》)等国外最新科技的结晶;国内《民用飞机总体设计》等总体阐述之作和《涡量动力学》《民用飞机气动设计》等专业细分的著作;也有《民机设计1000问》《英汉航空缩略语词典》等工具类图书。

该套图书得到国家出版基金资助,体现了国家对“大型飞机”项目以及“大飞机出版工程”这套丛书的高度重视。这套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,凝结了国内外航空领域专业人士的智慧和成果,具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性,既可作为实际工作指导用书,亦可作为相关专业人员的学习参考用书。期望这套丛书能够有益于航空领域里人才的培养,有益于航空工业的发展,有益于大飞机的成功研制。同时,希望能为大飞机工程吸引更多的读者来关心航空、支持航空和热爱航空,并投身于中国航空事业做出一点贡献。

顾诵芬

2009年12月15日

本书翻译人员

(按照姓名笔画排序)

姓 名	单 位	分 工
王祯鑫	中国航发商用航空发动机有限责任公司	第 2 章翻译
白国娟	中国航发商用航空发动机有限责任公司	第 14、15 章翻译
刘兴宇	中国商飞上海飞机设计研究院、中国商飞 复合材料中心	第 9 章翻译
刘沛禹	索尔维集团-氰特工程材料(上海)有限公司	第 4、5、10 章翻译
刘袁财	中国商飞上海飞机设计研究院、中国商飞 复合材料中心	第 17、19 章翻译
李志强	上海交通大学	第 20 章翻译
李 楠	大连理工大学	第 7 章翻译
杨 慧	中国商飞上海飞机设计研究院、中国商飞 复合材料中心	第 12、18、附录、索引 翻译
张大旭	上海交通大学	第 21 章翻译
张小耕	索尔维集团-氰特工程材料(上海)有限公司	第 8 章翻译
张 磊	航空工业第一飞机设计研究院	第 6 章翻译
陈秀华	上海交通大学	原版前言、作者介绍、第 1、13、16 章翻译
宗立率	大连理工大学	第 3 章翻译
董 怡	中航通飞华南飞机工业有限公司	第 11 章翻译

本书审校人员

(按照姓名笔画排序)

姓 名	单 位	分 工
王 进	航空工业沈阳飞机设计研究所	第 9 章审校
王锦艳	大连理工大学	第 3、7 章审校
田爱琴	中车青岛四方机车车辆股份有限公司	第 10、11 章审校
刘小青	南方航空沈阳飞机维修基地	第 4、19 章审校
刘兴宇	中国商飞上海飞机设计研究院、中国商飞 复合材料中心	第 12、18 章审校
李 强	中国商飞上海飞机设计研究院	第 16、17 章审校
杨 坤	中国航发商用航空发动机有限责任公司	第 14、15 章审校
杨卫平	航空工业第一飞机设计研究院	第 6 章审校
杨胜春	航空工业中国飞机强度研究所	第 13 章审校
陈秀华	上海交通大学	附录、索引审校
赵 龙	航空工业复材中心	第 5 章审校
郝 勇	中国航发沈阳发动机研究所	第 8 章审校
章 骏	中国商飞上海飞机设计研究院	第 1、2 章审校
蒋劲松	航空工业成都飞机设计研究所	第 20 章审校
焦 健	中国航发北京航空材料研究院	第 21 章审校
戴 棣	航空工业复材中心	第 5 章审校
蹇锡高	大连理工大学	译者序撰写

作者简介

F. C. 坎贝尔先生在波音公司度过了 38 年的职业生涯,直到 2007 年退休,在工程部门和制造部门的任职时间大致相等。他曾在工程实验室、制造研究与开发部门、四个飞机型号的工程部和生产操作部门工作。退休前他是结构材料和制造技术领域的高级技术委员,了解大量机身结构材料的性能、制造和装配过程。曾于 1995—2000 年担任制造工艺改进部门总监,于 1987—1995 年担任制造研究工程总监。在职业生涯早期,他从事材料和工艺开发工作,负责复合材料相关研究和开发项目。他还参与了 F-15、F/A-18、AV-8B 和 C-17 飞机项目,进行复合材料和金属材料的生产制造研究,并担任实验室工程师,负责金属基和有机物基体复合材料的工艺研究。

译者序

先进材料和先进装备制造是实现强国的工业基石。从西方主要发达国家的工业化进程来看,各国均把先进复合材料技术作为国家的核心竞争力和发展方向。

近几年,国内复合材料产业发展迅猛,主要源于以航空产业、高铁产业为代表的工业领域对结构轻量化的迫切需求。先进复合材料的用量已经成为评价航空及交通运输工具先进性的主要性能指标。当前,世界经济正在经历产业结构调整,我国产业结构升级也已进入关键时期,新一轮科技革命和产业革命正在进行。从产业结构角度来看,大力发展先进复合材料技术是助推产业升级,发展先进装备制造业的关键。

复合材料先进制造技术是国人自己的研发、制造经验的积累以及各方重要成果的汇总;其发展也得益于关于先进制造技术的国外优秀刊物和资料的引进、消化和吸收。本书对结构中使用的各类先进复合材料做了非常全面细致的阐述,涵盖了基础材料科学、复合材料成型模具及成型技术、加工及装配技术、材料性能、结构分析和试验以及维修等内容。本书指明了复合材料制造领域中的关键技术、制造经验和发展方向,对想了解更多复合材料相关知识的技术人员非常关键,对复合材料结构设计师、材料工程师以及工艺制造工程师和生产人员都会有较大的帮助。非常感谢 F. C. 坎贝尔先生将其毕生的复合材料领域的研究成果和工作经验展现给了全世界的读者。

本书的翻译得到了上海交通大学、大连理工大学、中国商飞上海飞机设计研究院、航空工业第一飞机设计研究院、航空工业成都飞机设计研究所、航空工业沈阳飞机设计研究所、中航通飞华南飞机工业有限公司、中航复合材料有限责任公司、航空工业中国飞机强度研究所、中国航发商用航空发动机

技术。

本书首先对复合材料进行综述性介绍(第1章);阐述了各向异性复合材料与金属等各向同性材料的差异,讨论了复合材料的一些重要优点和缺点;第1章也包含了一些先进复合材料的应用。第2章研究了增强体及其产品形式,重点内容是玻璃纤维、芳纶和碳纤维。第3章涵盖了主要的热固性和热塑性树脂体系。热固性树脂体系基体包括聚酯、乙烯基酯、环氧树脂、双马来酰亚胺、氰酸酯、聚酰亚胺和酚醛树脂;热塑性树脂体系基体包括聚醚醚酮、聚醚酮酮、聚醚酰亚胺和聚丙烯。第3章还介绍了热固性树脂的增韧机理,并介绍了用于表征树脂和层压板材料的物理化学测试方法。

第4~11章描述了复合材料制造工艺技术的进展情况。第4章介绍了固化工装的基础知识。第5章进行了热固性复合材料制造工艺的讨论。重要的热固性复合材料铺设方法包括湿法铺贴、预浸料铺贴、自动铺带、纤维自动铺放、长丝缠绕和拉挤成型。结合热固性材料的加成及缩合固化工艺,还讨论了固化准备过程中的真空袋封技术。热固性液体成型包括预制体成型技术(机织、针织、缝合与编织)和主要的液体成型工艺,即树脂传递模塑成型工艺(RTM)、树脂薄膜渗透成型工艺(RFI)和真空辅助树脂传递模塑成型工艺(VATRM)。

第6章介绍了热塑性复合材料的固化以及不同的热塑性塑料的热成型方法,最后讨论了热塑性复合材料独特的连接工艺。在详细描述了这些加工基础之后,第7章讨论了热固性复合材料和热塑性复合材料一些独特而具体的加工问题;引入了固化模型的概念以及铺层和固化参数、树脂静水压力、化学成分、树脂和预浸料、减压板和挡板的重要性;还介绍了残余固化应力和放热反应,简要介绍了在线固化监测技术。

在第8章和第9章中介绍了胶黏剂、夹层结构和整体共固化结构、胶黏剂胶接的基础以及其优缺点;讨论了连接的设计、表面处理和胶接工艺的重要性,以及蜂窝胶接组件、泡沫胶接组件和整体固化组件。大型整体复合材料机身结构的应用已经证明使用复合材料可以显著降低零件数量和装配成本。

第10章讨论了非连续纤维聚合物基体复合材料的性能和制造技术,重点是喷涂成型、模压成型、结构反应注塑成型和注塑成型。

装配(第11章)的成本在总制造成本中占很大一部分比例,高达总交付成本的50%。本章重点介绍了机械连接,包括用于结构组装的孔的加工工

艺和紧固件;也简要讨论了密封和表面处理。

第12~15章涵盖了复合材料的测试方法和性能。重要的非破坏性测试方法(第12章)包括视觉、超声、放射照相和热成像检测方法。机械性能试验方法(第13章)包括复合材料和胶黏剂体系的试验。在第14章中,比较了非连续增强和连续增强复合材料的强度和刚度。第15章涉及影响环境的重要专题,包括吸湿、流体暴露、紫外线辐射和腐蚀、雷击、热氧化行为、热损伤和易燃性。

第16~19章涵盖了复合材料的分析、设计和维修。结构分析(第16章)从单向板或单层板层级的分析开始,然后使用经典层压板理论来介绍更复杂的层压板分析方法;介绍了层间自由边应力的概念;讨论了四种失效准则:最大应力准则、最大应变准则、Azzi-Tsai-Hill最大功理论和Tsai-Wu失效准则。复合连接分析的重要专题,包括螺栓连接和胶接都在第17章中进行了介绍。第18章涉及复合材料的设计和认证考虑,包括材料和工艺选择、设计行业研究、积木式的认证方法、设计许用值和设计指南;还讨论了处理损伤容限和环境问题时的考虑因素。复合材料的修理(第19章)包括填充修理、注射修理、螺栓连接修理和胶接修理。

金属基复合材料(第20章)与其基底金属相比具有许多优点,例如具有较高的比强度和比刚度、较好的耐高温性、较低的热膨胀系数以及在某些情况下具有更好的耐磨性;缺点是它们比原金属更贵、韧性更低。由于成本高,因此金属基复合材料的商业应用受到一定限制。与金属基复合材料相比,陶瓷基复合材料的商业应用(第21章)也很少,因为它们的成本也非常高,并且也有基于对可靠性的考虑。碳-碳复合材料已应用于航天结构的热防护系统。当然,金属基和陶瓷基复合材料仍然是重要的材料类别,因为它们被认为是未来超声速飞行器的关键材料。

请注意,本书中提供的数据不是设计许用值,读者应查阅经批准的设计手册并通过统计学分析以获得设计许用值。

我要感谢安·布雷顿、艾琳·德·吉尔、史蒂夫·兰帕曼、马德里·特兰布爾、ASM(美国材料协会)国际组织以及ASM的工作人员对本书所做的重要贡献,感谢他们的帮助和指导。我还要感谢我的妻子贝蒂对我一如既往的支持。

F. C. 坎贝尔
美国圣路易斯密苏里州
2010年7月

目 录

1 复合材料绪论 1

1.1 各向同性、各向异性、正交各向异性材料 4

1.2 层压板 6

1.3 基本性能公式 9

1.4 复合材料与金属的比较 11

1.5 复合材料的优缺点 13

1.6 复合材料的应用 18

参考文献 26

精选参考文献 26

2 纤维及增强体 27

2.1 纤维术语 27

2.2 纤维的强度 31

2.3 玻璃纤维 32

2.4 芳纶 37

2.5 超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维 39

2.6 碳纤维和石墨纤维 40

2.7 机织物 48

2.8 增强毡 53

2.9 短切纤维 53

2.10 预浸料制造 54

参考文献 60

精选参考文献 61

3 基体树脂体系 62

3.1 热固性树脂 63

3.1.1 不饱和聚酯树脂和乙烯基酯树脂 64

3.1.2 环氧树脂 66

3.1.3 双马来酰亚胺树脂 71

3.1.4 氰酸酯树脂 72

3.1.5 聚酰亚胺树脂 74

3.1.6 酚醛树脂 75

3.1.7 增韧热固性树脂 76

3.2 热塑性树脂 83

3.2.1 热塑性复合材料基体树脂 84

3.2.2 热塑性复合材料产品形式 89

3.3 质量控制方法 92

3.3.1 化学测试 92

3.3.2 流变学测试 94

3.3.3 热分析 96

3.3.4 玻璃化转变温度 99

3.4 结论 101

参考文献 101

精选参考文献 102

4 复合材料成型工装 104

4.1 整体描述 104

4.2 热系统管理 109

4.3 模具制造 114

参考文献 121

精选参考文献 121

5 热固性复合材料制造工艺 123

5.1 湿法铺叠 123

- 5.2 预浸料铺叠 127
 - 5.2.1 手工铺叠 127
 - 5.2.2 平面铺叠和真空成型 129
 - 5.2.3 卷制成型 130
 - 5.2.4 自动工艺 130
 - 5.2.5 真空袋封装 136
 - 5.2.6 固化 139
- 5.3 低温/真空袋预浸料固化成型 143
- 5.4 纤维缠绕成型 148
- 5.5 液体成型 153
 - 5.5.1 预制体制造技术 155
 - 5.5.2 树脂注入成型 169
 - 5.5.3 预制体工艺 173
 - 5.5.4 RTM 固化工艺 174
 - 5.5.5 RTM 模具工艺 175
 - 5.5.6 RTM 工艺缺陷 178
 - 5.5.7 真空辅助树脂转移成型 180
- 5.6 树脂膜浸润成型 182
- 5.7 拉挤成型 185
- 参考文献 190
- 精选参考文献 191

6 热塑性复合材料制造工艺 193

- 6.1 热塑性材料固结工艺 193
- 6.2 热压成型 197
- 6.3 热塑性连接工艺 204
- 参考文献 209
- 精选参考文献 210

7 聚合物基复合材料的加工科学 211

- 7.1 动力学 212
- 7.2 黏度 217

- 7.3 热传递 218
- 7.4 树脂流动 220
 - 7.4.1 静液树脂压力研究 225
 - 7.4.2 树脂流动建模 227
- 7.5 空洞与孔隙 230
- 7.6 残余应力 238
- 7.7 固化监控技术 244
- 致谢 245
- 参考文献 245
- 精选参考文献 246

8 胶接 247

- 8.1 胶黏剂理论 248
- 8.2 表面准备 248
 - 8.2.1 复合材料表面处理 249
 - 8.2.2 铝合金表面处理 251
 - 8.2.3 钛合金表面处理 254
 - 8.2.4 铝合金以及钛合金底胶 254
- 8.3 环氧胶黏剂 255
 - 8.3.1 双组分室温固化环氧液态和糊状胶黏剂 258
 - 8.3.2 环氧胶膜 259
- 8.4 胶接过程 261
 - 8.4.1 胶接组件预装 262
 - 8.4.2 预装评估 262
 - 8.4.3 胶黏剂应用 263
 - 8.4.4 胶接线厚度控制 264
 - 8.4.5 胶接 265

参考文献 267

精选参考文献 267

9 夹层及整体共固化结构 268

- 9.1 夹层结构 268