



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

大飞机出版工程
总主编 顾诵芬

民机先进制造工艺技术系列
主编 林忠钦

先进复合材料的 制造工艺

Manufacturing Processes for
Advanced Composites

【美】F·C·坎贝尔 著
戴 棣 朱月琴 译



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



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

民机先进制造工艺技术系列

主 编 林忠钦

先进复合材料的 制造工艺

Manufacturing Processes for
Advanced Composites

【美】F·C·坎贝尔 著
戴 棣 朱月琴 译



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

内容提要

本书意在满足希望深入了解树脂基复合材料制造技术的读者需求。书中介绍了树脂基复合材料的构成、主要的增强纤维和基体树脂类型、树脂基复合材料的性能特点及其主要用途。着重和系统地阐述了制造树脂基复合材料产品所采用的各类方法,以及不同方法的工艺原理、质量控制影响因素、模具形式和适用对象。此外,书中还对复合材料产品制造和使用过程涉及的胶接、加工、装配、无损检测和修理问题进行了讨论。对于从事复合材料生产的技术人员和高校相关专业的学生,本书可以起到很好的帮助作用。

This edition of *Manufacturing Processes for Advanced Composites* by Flake Campbell Jr is published by arrangement with ELSEVIER LIMITED of The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1GB, UK.

上海市版权局著作权合同登记号:09-2014-813

图书在版编目(CIP)数据

先进复合材料的制造工艺/(美)F. C. 坎贝尔(Flake C. Campbell)著;

戴棣,朱月琴译. —上海:上海交通大学出版社,2016

(大飞机出版工程)

ISBN 978-7-313-16300-4

I. ①先… II. ①F…②戴…③朱… III. ①复合材料—制造

IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 309771 号

先进复合材料的制造工艺

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

出 版 人:郑益慧

印 制:苏州市越洋印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:492千字

版 次:2016年12月第1版

书 号:ISBN 978-7-313-16300-4/V

定 价:195.00元

译 者:戴 棣 朱月琴

地 址:上海市番禺路951号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:25.75

印 次:2016年12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:0512-68180638

丛书编委会

总主编

顾涌芬（中国航空工业集团公司科技委副主任、中国科学院和中国工程院院士）

副总主编

金壮龙（中国商用飞机有限责任公司董事长）

马德秀（上海交通大学原党委书记、教授）

编委（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）

许金泉（上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院教授）

杨育中（中国航空工业集团公司原副总经理、研究员）

吴光辉（中国商用飞机有限责任公司副总经理、总设计师、研究员）

汪海（上海市航空材料与结构检测中心主任、研究员）

沈元康（中国民用航空局原副局长、研究员）

陈刚（上海交通大学原副校长、教授）

陈迎春（中国商用飞机有限责任公司常务副总设计师、研究员）

林忠钦（上海交通大学常务副校长、中国工程院院士）

金兴明（上海市政府副秘书长、研究员）

金德琨（中国航空工业集团公司科技委委员、研究员）

崔德刚（中国航空工业集团公司科技委委员、研究员）

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）

民机先进制造工艺技术系列

编 委 会

主 编

林忠钦（上海交通大学常务副校长、中国工程院院士）

副主编

姜丽萍（中国商飞上海飞机制造有限公司总工程师、研究员）

编 委（按姓氏笔画排序）

习俊通（上海交通大学机械与动力学院副院长、教授）

万 敏（北京航空航天大学飞行器制造工程系主任、教授）

毛荫风（中国商飞上海飞机制造有限公司原总工程师、研究员）

孙宝德（上海交通大学材料科学与工程学院院长、教授）

刘卫平（中国商飞上海飞机制造有限公司副总工程师、研究员）

汪 海（上海市航空材料与结构检测中心主任、研究员）

陈 洁（中国商飞上海飞机制造有限公司总冶金师、研究员）

来新民（上海交通大学机械与动力工程学院机械系主任、教授）

陈 磊（中国商飞上海飞机制造有限公司副总工程师、航研所所长、研究员）

张 平（成飞民机公司副总经理、技术中心主任、研究员）

张卫红（西北工业大学副校长、教授）

赵万生（上海交通大学密歇根学院副院长、教授）

倪 军（美国密歇根大学机械工程系教授、上海交通大学密歇根学院院长、教授）

黄卫东（西北工业大学凝固技术国家重点实验室主任、教授）

黄 翔（南京航空航天大学航空宇航制造工程系主任、教授）

武高辉（哈尔滨工业大学金属基复合材料与工程研究所所长、教授）

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、比重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。军事和民生对飞机的需求促进了飞机迅速而不间断的发展和运用,体现了当代科学技术的最新成果;而航空领域的持续探索和不断创新,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起我国自主航空事业,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。大型客机项目其产业链长、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 B737 和

空客 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,集成了数学、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“大型飞机”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飞机研制工作。我本人作为航空事业发展50年的见证人,欣然接受了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“大型飞机”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”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》《英汉航空双向词典》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

序

制造业是国民经济的主体,是立国之本、兴国之器、强国之基。《中国制造2025》提出,坚持创新驱动、智能转型、强化基础、绿色发展,加快从制造大国转向制造强国。航空装备,作为重点发展的十大领域之一,目前正处于产业深化变革期;加快大型飞机研制,是航空装备发展的重中之重,也是我国民机制造技术追赶腾飞的机会和挑战。

民机制造涉及新材料成形、精密特征加工、复杂结构装配等工艺,先进制造技术是保证民机安全性、经济性、舒适性、环保性的关键。我国从运-7、新支线ARJ21-700到正在研制的C919、宽体飞机,开展了大量的工艺试验和技术攻关,正在探索一条符合我国民机产业发展的技术路线,逐步建立起满足适航要求的技术平台和工艺规范。伴随着ARJ21和C919的研制,正在加强铝锂合金成形加工、复合材料整体机身制造、智能自动化柔性装配等技术方面的投入,以期为在宽体飞机等后续型号的有序可控生产奠定基础。但与航空技术先进国家相比,我们仍有较大差距。

民机制造技术的提升,有赖于国内五十多年民机制造的宝贵经验和重要成果的总结,也将得益于借鉴国外的优秀出版物和数据资料引进。因此有必要编著一套以“民机先进制造工艺技术”为主题的丛书,服务于在研大型飞机以及后续型号的开发,同时促进我国制造业技术的发展和紧缺人才的培养。

本系列图书筹备于2012年,启动于2013年,为了保证本系列图书的品质,先后召开三次编委会会议和图书撰写会议,进行了丛书框架的顶层设计、提纲样章的评审。在编写过程中,力求突出以下几个特点:①注重时效性,内容上侧重在目前民机

研制过程中关键工艺;②注重前沿性,特别是与国外先进技术差距大的方面;③关注设计,注重民机结构设计及制造问题的系统解决;④强调复合材料制造工艺,体现民机先进材料发展的趋势。

该系列丛书内容涵盖航空复合材料结构制造技术、构件先进成形技术、自动化装配技术、热表特种工艺技术、材料和工艺检测技术等面向民机制造领域前沿的关键性技术方向,力求达到结构的系统性,内容的相对完整性,并适当结合工程应用。丛书反映了学科的近期和未来的可能发展,注意包含相对成熟的内容。

本系列图书由中国商飞上海飞机制造有限公司、中航工业成飞民机公司、沈阳飞机设计研究所、北京航空制造工程研究所、中国飞机强度研究所、沈阳铸造研究所、北京航空航天大学、南京航空航天大学、西北工业大学、上海交通大学、西安交通大学、清华大学、哈尔滨工业大学和南昌航空航天大学等单位的航空制造工艺专家担任编委及主要撰写专家。他们都有很高的学术造诣,丰富的实践经验,在形成系列图书的指导思想、确定丛书的覆盖范围和内容、审定编写大纲、确保整套丛书质量中,发挥了不可替代的作用。在图书编著中,他们融入了自己长期科研、实践中获得的经验、发现和创新,构成了本系列图书最大的特色。

本系列图书得到 2016 年国家出版基金的资助,充分体现了国家对“大飞机工程”的高度重视,希望该套图书的出版能够真正服务到国产大飞机的制造中去。我衷心感谢每一位参与本系列图书的编著人员,以及所有直接或间接参与本系列图书审校工作的专家学者,还有上海交通大学出版社的“大飞机出版工程”项目组,正是在所有工作人员的共同努力下,这套图书终于完整地呈现在读者的面前。我衷心希望本系列图书能切实有利于我国民机制造工艺技术的提升,切实有利于民机制造行业人才的培养。



2016年3月25日

译者序

2004年7月经时任澳大利亚工科院(CSIRO)复合材料和纳米材料研究室主任伍东阳博士的牵线搭桥和亲自陪同,作者来到我所在的中国飞机强度研究所和国内其他单位进行了学术交流。作者在先进复合材料的制造方法方面的丰富经验给听众留下了深刻的印象,对国内航空复合材料结构制造方法的发展起到了一定的促进作用。近年来随着交通运输车辆结构(飞机、轨道交通车辆、汽车等)轻量化需求的要求越来越迫切,碳纤维复合材料作为轻量化的首选材料,也得到了越来越广泛的应用,各工业领域的技术人员苦于缺乏有关其制造方法的知识,因此译者希望能将国外的先进技术介绍到国内。不同于其他类似的著作,本书作者经历了波音公司碳纤维复合材料结构应用发展的全过程,具有丰富的实践经验,该著作是其毕生实践经验的总结,至今仍然是碳纤维复合材料技术方面宝贵的财富。对缺乏先进复合材料制造方法知识的工程技术人员,本书是一本最适合工程师全面了解碳纤维复合材料结构制造方法的教科书,同时也是有助于他们在解决实践中遇到问题,从中寻找解决途径的参考书。在作者2004年访华期间本人有幸得到了他的赠书,一直珍藏至今,虽然作者已然去世,仍感有责任把他的遗著译成中文,以志纪念,同时有益于国人,以促进先进复合材料在工业领域的推广应用。在几位复合材料业内同事和上海交通大学出版社的大力帮助下,这一想法终得实现。

本书前言及1~4章由朱月琴翻译,沈真校对。5~6章由朱月琴翻译,戴棣校对。7~13章由戴棣翻译,陈志平校对。沈真和戴棣负责全书通校。

沈真

2016年11月

作者介绍

Flake C. Campbell



Flake C. Campbell 是波音公司鬼怪工厂研发机构制造技术领域的资深技术院士,目前负责先进复合材料和金属结构方面的研发项目。他在波音 34 年的职业生涯可均分为工程和制造两个部分,先后在工程试验部、制造研发部、三大飞机制造项目中的复合材料工程部和生产运营部门工作。他在成为资深技术院士之前,在圣路易斯运营部的制造工艺改进部门做了 5 年部长,在先进制造技术部做了 9 年部长。拥有金属工程学士和硕士学位以及 MBA 学位。

作 者 序

本书面向有意深入了解制造及装配先进复合材料产品所用材料和工艺的读者而写作。尽管先进复合材料可由多种不同类型的纤维与聚合物、金属或陶瓷基体复合而成,但本书所述对象限定在采用三种最常用纤维(玻璃、芳纶、碳)增强的聚合物基复合材料。

本书(第1章)首先对纤维、基体和产品形式进行综述,然后简要介绍书中涉及的各种制造工艺以及复合材料的优缺点。第1章中还包括了一些先进复合材料的应用实例。第2章对增强体材料和预浸料进行了进一步的详细讨论。第3章所覆盖的内容为主要的热固性树脂体系,包括聚酯、乙烯基酯、环氧、双马来酰亚胺、聚酰亚胺和酚醛树脂。该章还介绍了树脂的增韧原理,以及用于树脂和固化后层压板性能表征的理化检测方法。

第4至7章按实际顺序对工艺流程进行递进介绍。其中第4章涵盖固化工装的基本知识,随后在第5章介绍铺层的铺叠,包括手工铺叠、平面铺叠、自动铺带、纤维缠绕和纤维铺放等重要铺叠方法。在第五章中还讨论了作为固化准备工作的真空袋封装问题。第六章讨论热固性树脂的加成和缩合固化工艺,以及包括树脂净重压力、化学成分、树脂和预浸料状态、预压实处理和均压板在内的铺叠和固化变因的重要性。此章还包括了固化残余应力、反应热、固化过程监测以及固化模型方面的内容。第7章围绕一个研究工作实例介绍了化学成分和工艺过程对层压板质量的影响作用。

第8章介绍胶接和整体共固化结构。此章包括了胶接的基本要素及优缺点。讨论了接头设计、表面处理和胶接工艺的重要性,以及蜂窝夹层胶接结构、泡沫夹层胶接结构和整体共固化结构。

第9章介绍液体成形。内容包括预成形体技术(机织、针织、缝合、编织),以及主要的液体成形工艺,即树脂转移成形(RTM)、树脂膜浸注(RFI)和真空辅助树脂转移成形(VARTM)。

第 10 章讨论热塑性复合材料。内容首先为主要的基体材料和产品形式,然后涉及热塑性材料的固化和不同的成形方法。最后还讨论了热塑性复合材料独特的连接工艺。

第 11 章介绍民用复合材料产品的一些重要工艺。重点讲述铺叠、模压、注射、结构反应注射以及拉挤等成形工艺。

第 12 章讲述专门针对复合材料的结构装配工艺。此章的重点在于机械连接,包括孔的制备工艺和用于复合材料装配的紧固件。此章还简单介绍了复合材料结构的密封和涂漆。

最后一章(第 13 章)包括两个主题:无损检测(NDI)和修理。提及的 NDI 方法包括目视检测、超声波检测、射线检测和热成像检测。修理部分的内容包括填充修理、注射修理、螺接修理和胶接修理。

应该指出,本书内容仅限于先进复合材料制造过程中所使用的材料及工艺,未涉及单层、层压板、胶接接头或螺栓连接接头的力学问题。如将本书用作教材,可能更适宜于复合材料的中级教程。

作者对参与本书审阅的下列同事深表谢意: Gray Bond, Ray Bohlman, John Griffith, Mike Karal, Dan King, Bob Kisch, Doug McCarville, Mike Paleen 和 Bob Rapp。书中的任何错误均由作者负责。

F. C. Campbell

圣路易斯,密苏里州 2003 年 12 月

目 录

- 1 复合材料和工艺概论：需要特殊工艺的特殊材料 1
 - 1.1 层压板 2
 - 1.2 纤维 4
 - 1.3 基体 7
 - 1.4 材料产品形式 10
 - 1.5 制造工艺综述 14
 - 1.6 复合材料的优缺点 20
 - 1.7 应用 24
 - 1.8 总结 26
 - 参考文献 28

- 2 纤维及增强体：提供强度的丝材 29
 - 2.1 纤维术语 29
 - 2.2 玻璃纤维 30
 - 2.3 芳纶纤维 33
 - 2.4 超高分子量聚乙烯(UHMPE)纤维 34
 - 2.5 碳纤维和石墨纤维 34
 - 2.6 机织物 36
 - 2.7 增强毡 40
 - 2.8 短切纤维 40
 - 2.9 预浸料制造 41
 - 2.10 总结 45

参考文献 46

3 热固性树脂：维系丝材的胶黏剂 48

- 3.1 热固性基体 49
 - 3.2 聚酯树脂 49
 - 3.3 环氧树脂 50
 - 3.4 双马来酰亚胺树脂 57
 - 3.5 氰酸酯树脂 59
 - 3.6 聚酰亚胺树脂 61
 - 3.7 酚醛树脂 62
 - 3.8 增韧方法 63
 - 3.9 物理化学试验和质量控制 69
 - 3.10 化学试验 70
 - 3.11 流变试验 71
 - 3.12 热分析 72
 - 3.13 玻璃化转变温度 73
 - 3.14 总结 76
- 参考文献 77

4 固化用模具：迟早需要的投入 79

- 4.1 一般性考虑 79
 - 4.2 对热相关问题的处理 84
 - 4.3 模具制造 89
 - 4.4 总结 96
- 参考文献 97

5 铺叠：成本的主要动因 99

- 5.1 预浸料控制 99
- 5.2 铺叠间环境 100
- 5.3 模具准备 100
- 5.4 手工铺叠的铺层剪裁 100
- 5.5 铺叠 102

- 5.6 平面铺叠及真空成形 104
- 5.7 自动铺带 107
- 5.8 纤维缠绕 109
- 5.9 纤维铺放 116
- 5.10 真空袋封装 119
- 5.11 总结 126
- 参考文献 126

- 6 固化：一个有关时间(t)、温度(T)和压力(P)的问题 128**
 - 6.1 环氧基复合材料的固化 132
 - 6.2 空隙的形成理论 134
 - 6.3 关于树脂静水压力的研究 139
 - 6.4 化学成分的可变因素 146
 - 6.5 零吸胶和低流动性树脂体系 147
 - 6.6 树脂和预浸料的可变因素 147
 - 6.7 铺叠的可变因素 149
 - 6.8 预压实处理 150
 - 6.9 均压板和增压块 153
 - 6.10 缩合反应固化的材料体系 153
 - 6.11 固化残余应力 155
 - 6.12 反应热 161
 - 6.13 固化过程监测 162
 - 6.14 固化模型 162
 - 6.15 总结 163
 - 参考文献 164

- 7 化学成分和工艺过程对碳/环氧层压板质量的影响：综合的作用结果 166**
 - 7.1 预浸料的物理特性 167
 - 7.2 化学特性 169
 - 7.3 热性能 171
 - 7.4 流变特性 173
 - 7.5 层压板评估 174