



航空基础技术丛书

# 航空复合材料技术

AERONAUTICAL COMPOSITE TECHNOLOGY

中国航空工业集团公司复合材料技术中心◎主编



航空工业出版社



航空基础技术丛书

# 航空复合材料技术

中国航空工业集团公司复合材料技术中心 主编

航空工业出版社

北京

## 内 容 提 要

本书比较全面、系统地介绍了国内外航空复合材料技术的发展现状及其趋势。全书共分9章,从航空复合材料概论开始,分别介绍了复合材料的增强材料、航空复合材料树脂基体、航空复合材料结构设计、航空树脂基复合材料、金属基、陶瓷基和碳基复合材料、复合材料性能表征与测试、功能复合材料和智能复合材料技术,最后给出了航空复合材料技术的发展展望。

本书可供复合材料领域相关行业的工程技术人员、管理人员以及复合材料科学与工程专业的师生参考阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

航空复合材料技术/中国航空工业集团公司复合材料技术中心主编. --北京:航空工业出版社,2013.12  
(航空基础技术丛书)

ISBN 978-7-5165-0293-8

I. ①航… II. ①中… III. ①航空材料-复合材料  
IV. ①V25

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第271305号

### 航空复合材料技术

Hangkong Fuhe Cailiao Jishu

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑路2号院 100012)

发行部电话:010-84936555 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2013年12月第1版

2013年12月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:17.5

字数:445千字

印数:1—3500

定价:70.00元

## 《航空基础技术丛书》总审委会

主	任	林左鸣				
常务副主任		谭瑞松				
副主任		顾惠忠	吴献东	耿汝光	李玉海	
		张新国	高建设	李方勇	孙卫福	
成	员	关 桥	曹春晓	赵振业	李 明	刘大响
		冯培德	陈祥宝	魏金钟	刘 林	周国强
		王英杰	梁丽涛	杨胜群	曹英杰	戴圣龙
		孙侠生	张 军	赵 波	夏裕彬	张振伟
		张明习	谢富原			

## 《航空基础技术丛书》总编委会

**主任** 徐占斌  
**副主任** 荣毅超 李晓红 吴世平 陈刚 刘鑫  
**成员** 向明 梅方清 姚俊臣 周宁 史晋蕾  
李小飞 徐明 吴晓峰 张力 李兴无  
杨海 李志强 李周复 黄蓝 刘恩朋  
轩立新 益小苏 段泽民

## 《航空基础技术丛书》编写办公室

**主任** 梅方清 姚俊臣  
**副主任** 周宁 史晋蕾  
**成员** 李小飞 郭晓月 熊昌友 郭倩旎 冯冰  
李亚军 李少壮 杨素玲 胡律行 王湘念  
陈玉 汪慧云 杨占才 李冬 张明  
姚红

## 《航空基础技术丛书》总序

近年来，以一批先进重点型号为代表的我国航空武器装备取得了“井喷式”的发展，航空工业实现了与发达国家从“望尘莫及”到“望其项背”的历史性跨越。但我们也要清醒地看到，面对新航空装备新一轮“井喷式”发展的需要，我们面临着加强航空科技创新的迫切需求。

党的十八大报告指出，要实施创新驱动发展战略，坚持走中国特色自主创新道路，以全球视野谋划和推动创新。航空工业作为高科技战略性新兴产业，在加强自主创新和提升创新能力方面面临三个方面的挑战：一是传统的技术跟随式发展模式已经走到了尽头；二是长期积累的技术创新成果已充分应用，技术储备急需创新实践来大量补充；三是新航空装备跨越式发展对技术和管理创新提出更高要求。

要实施创新驱动的发展战略，首先要注重原始创新。加大现象发现和原理验证力度，探索未知技术领域，积极寻求原创性突破，形成一批引领未来发展，技术成熟度在1~3级的创新成果。更要注重技术创新。航空基础技术作为航空科技的重要组成部分，发挥着重要的支撑作用，支持和引领着航空科技的发展。在国家科技重大专项、重点型号攻关、新型飞机和发动机的研制中都起着强有力的保障与支撑作用，具有重要的战略意义。随着我国从跟踪研制向自主创新、从制造大国到制造强国的转变，作为科技前沿的航空基础技术必将从服务和保障的方式向技术引领方式转变，并向社会其他国民经济领域进行技术转移和输出，为全社会的技术进步和创新发展起到强有力的推动作用。

中国航空工业集团公司基础技术研究院作为航空工业基础技术的龙头，肩负着支撑、引领型号发展的双重任务，本着“航空报国，强军富民”的理念，践行“变革为先，创新为本”的精神，以知识产权战略为抓手，牵引原始创新，推动技术创新，加强管理创新，最终实现从“型号牵引”到“牵引型号”的转变。

航空基础技术的传承与传播，与航空基础技术的研究与探索同样重要。目前，我们急需有关论述基础技术等科技前沿技术的专著。因此，在中国航空工业集团公司倡导下，由中国航空工业集团公司基础技术研究院组织所属 12 家单位联合编写了一套大型基础技术专著《航空基础技术丛书》。《航空基础技术丛书》的编写，开创了航空工业各专业板块之先河，为航空工业知识积累、传承、宣传工作，为航空科学技术服务于社会开了一个好头。这种勤勉探索，对航空工业、对全社会负责的精神，值得大力提倡。

该丛书的编写，对梳理航空工业基础技术的发展脉络，宣传航空基础技术成就，引领未来航空基础技术发展方向将起到重要作用，对政府主管部门、航空工业用户、其他工业领域用户了解航空基础技术提供了一个良好的媒介，对广大航空爱好者、尤其是青年人了解航空、热爱航空起到了宣传作用，亦对社会输出相关技术、服务于我国科技进步做出了贡献。

中国航空工业集团公司董事长  
党组书记



2013 年 8 月

## 《航空基础技术丛书》总前言

我国航空工业经过六十多年的发展，逐步形成了专业门类齐全，科研、试验、生产相配套，具备研制生产当代航空装备能力的高科技工业体系，发展了多类型多用途的飞机、直升机、发动机、导弹，研制出一批具有自主知识产权并与发达国家在役航空装备性能相当的航空器，大幅度缩小了与国外先进水平的差距，使我国跻身于能够研制先进的歼击机、歼击轰炸机、直升机、教练机、特种飞机等多种航空装备的少数几个国家之列，为我国国民经济建设、国防现代化建设、社会科技进步和综合国力的提升做出了重大贡献。

航空工业作为国家的战略性产业，决定了它的发展必须建立在牢固的基础之上。所谓跨越式发展，是长期扎扎实实、厚积薄发的结果。航空基础技术作为整个航空工业的根基，在整个航空工业的发展中起着举足轻重的作用。因此，认真梳理航空基础技术发展脉络，跟踪国际航空基础技术的发展趋势，不断创新我国航空基础技术，并为航空工业新产品研制做好技术储备，成为航空工业的一项重要任务。

为完成中国航空工业集团公司基础技术研究院“打牢基础、做强技术、支撑型号、创造财富”的使命，作为中国航空工业集团公司横向价值链的最前端，基础院承担着包括政府科研、装备预研等方面的研究任务，拥有12家科研院所和高科技企业、多个国家工程实验室和国防科技重点实验室以及航空科技重点实验室，为国防科技工业和航空科技实现长远的跨越式发展提供了技术保障，为我国航空工业又好又快发展贡献着力量。

为强化从知识创新、技术创新到成果产业化的有效传导机制，提升航空基础研究成果产业化运作能力，充分体现基础技术在基础保障、技术引领、服务支撑等方面的作用，中国航空工业集团公司基础技术研究院（简称基础院）组织编写了《航空基础技术丛书》，全面介绍了航空



基础技术的范围、内容、现状、发展趋势等，尤其对各种技术的工程化应用特点、新技术对航空装备的影响作了重点介绍，对产品设计者提高新产品设计性能，用户提升对新产品的信任起到了较大作用。通过总结经验、探索航空基础技术发展趋势，进一步构筑和完善了相关材料、制造、标准化、计量、强度、气动、测试、雷电防护等技术体系，从而夯实航空工业发展的根基，实现航空基础技术从“型号牵引”到“牵引型号”的转型升级。

《航空基础技术丛书》分为《航空标准化与通用技术》、《航空精密超精密制造技术》、《航空计量技术》、《航空材料技术》、《航空结构强度技术》、《航空制造技术》、《航空气动力技术》、《航空故障诊断与健康管理技术》、《航空测试技术》、《航空电磁窗技术》、《航空复合材料技术》、《航空器雷电防护技术》12个分册，分别由基础院所属中国航空综合技术研究所、北京航空精密机械研究所、北京长城计量测试技术研究所、北京航空材料研究院、中国飞机强度研究所、北京航空制造工程研究所、中国航空工业空气动力研究院、上海航空测控技术研究所、北京长城航空测控技术研究所、济南特种结构研究所、中国航空工业集团公司复合材料技术中心、合肥航太电物理技术有限公司等12家科研院所和高科技企业负责编写。主编单位汇集了各个相关专业的一线科研骨干承担编写工作，由各相关专业的院士、专家负责审稿，并由各单位总工程师担任各分册编委会主任，意在全面、准确地介绍各相关专业的现状、发展趋势及应用特点。

该丛书适合航空工业相关部门、航空工业所属企事业单位，总装、空军、海军等装备需求部门，航天、兵器、船舶、核、电子等军工相关部门管理人员及相关技术人员，以及相关院校的师生等阅读。

由于航空基础技术涵盖范围甚广，相关科学技术发展很快，不足之处，还望广大读者批评指正。

中国航空工业集团公司副总经理

徐占斌

2013年8月

## 《航空复合材料技术》审委会

**主 任** 谢富原

**成 员** 陈祥宝 孟凡君 李 轶 邢丽英 王国平  
廖子龙 蔡良元 包建文 李 敏 侯军生

## 《航空复合材料技术》编委会

主 任 益小苏

成 员 曹正华 李宏运 田铁兵 赵 龙 梁宪珠  
刘善国 仝建峰 刘松平 戴 棣 孙占红  
郝 巍 张宝艳 唐邦铭 张 明 唐建茂

## 《航空复合材料技术》前言

《航空复合材料技术》是由中国航空工业集团公司复合材料技术中心（公司）组织编写的专业技术类书籍，是《航空基础技术丛书》的分册之一。

复合材料由于其优异的轻质高强高模性能，已成为并正在继续成为各类军民航空装备的关键材料，这已是不争的事实。今天，复合材料的用量已成为衡量航空装备先进性的重要标志，航空材料的未来发展须臾离不开复合材料。

在复合材料家族中，结构性树脂基复合材料的技术、经济和社会应用价值有着压倒性优势，因此对树脂基复合材料的研究与应用一直是世界各国复合材料研究和应用的主体；而在航空结构材料技术领域，连续碳纤维增强的树脂基复合材料又是重中之重，且正处于高速发展阶段，因此，本书中的复合材料主要指的是连续碳纤维增强的树脂基结构复合材料。

《航空复合材料技术》全书共分9章，由唐见茂提供了全书的初稿，在此基础上，第1章概论由益小苏修改完成，第2章复合材料增强材料到第8章功能复合材料与智能复合材料技术由张明修改完成，第9章航空复合材料技术的发展展望由益小苏撰写，最后由张明和刘畅对全书进行了校阅。

《航空复合材料技术》具有系统性、专业性、新颖性、先进性及实用性相统一的特点，可供复合材料领域相关行业的工程技术人员、管理人员以及复合材料科学与工程专业的师生查阅。

本书的撰写过程得到了中国航空工业集团公司基础技术研究院科技部和航空工业出版社的大力支持和指导，在此表示诚挚的感谢；也感谢本书编委会和审委会组织的数次评审，感谢航空工业出版社对本书编辑

的劳作！在此特别感谢唐见茂研究员和张明博士在百忙中抽出时间参与编写，没有他们的理解、支持和奉献，本书的成稿是根本不可能的。

《航空复合材料技术》由于内容多、时间紧和受编著者水平所限，其中难免存在不少问题和不足，敬请广大读者批评指正。

《航空复合材料技术》编委会

2013年5月

# 目 录

第1章 概 述 .....	( 1 )
1.1 航空复合材料技术的发展历程 .....	( 1 )
1.1.1 飞机机体树脂基复合材料技术 .....	( 1 )
1.1.2 航空发动机复合材料技术 .....	( 10 )
1.1.3 航空复合材料技术体系 .....	( 14 )
1.1.4 航空复合材料技术要点 .....	( 16 )
1.1.5 航空复合材料技术的发展现状与发展趋势 .....	( 32 )
第2章 复合材料增强材料 .....	( 38 )
2.1 增强材料 .....	( 39 )
2.1.1 纤维增强材料 .....	( 39 )
2.1.2 其他增强材料 .....	( 57 )
2.2 夹芯材料 .....	( 62 )
2.2.1 夹芯材料按使用要求分类 .....	( 63 )
2.2.2 夹芯材料按形状分类 .....	( 63 )
2.3 填充材料 .....	( 66 )
第3章 航空复合材料树脂基体 .....	( 69 )
3.1 复合材料树脂基体性能要求 .....	( 69 )
3.1.1 耐热性 .....	( 69 )
3.1.2 热膨胀系数 (CTE) .....	( 70 )
3.1.3 力学性能 .....	( 71 )
3.1.4 电性能 .....	( 71 )
3.1.5 耐环境性 .....	( 72 )
3.2 高性能树脂基体 .....	( 73 )
3.2.1 高性能树脂基体分类 .....	( 73 )
3.2.2 环氧树脂 .....	( 73 )
3.2.3 双马来酰亚胺树脂 .....	( 78 )
3.2.4 聚酰亚胺树脂 .....	( 82 )
3.2.5 氰酸酯树脂 .....	( 88 )
3.2.6 热塑性树脂 .....	( 89 )
第4章 航空复合材料结构设计 .....	( 92 )
4.1 复合材料力学简介 .....	( 92 )
4.2 复合材料的性能特点 .....	( 94 )
4.3 复合材料结构设计概述 .....	( 95 )
4.3.1 复合材料结构设计一般原则 .....	( 96 )

4.3.2	复合材料结构设计过程	( 97 )
4.4	设计要求	( 98 )
4.4.1	结构性能要求	( 98 )
4.4.2	工艺要求	( 99 )
4.4.3	使用环境要求	( 99 )
4.5	材料设计	(100)
4.5.1	结构选材	(100)
4.5.2	单层性能	(101)
4.5.3	层压板设计	(102)
4.6	典型结构件和部件设计	(106)
4.6.1	典型结构件设计	(106)
4.6.2	飞机部件设计	(109)
4.7	复合材料结构设计概念创新	(110)
4.7.1	“整体化”设计概念	(110)
4.7.2	智能化结构设计概念	(111)
4.8	结构验证	(112)
4.8.1	初步设计阶段试验	(112)
4.8.2	结构研制阶段试验	(112)
4.8.3	全尺寸部件验证试验	(113)
<b>第5章</b>	<b>航空树脂基复合材料</b>	(115)
5.1	航空树脂基复合材料分类	(118)
5.1.1	环氧树脂基复合材料	(118)
5.1.2	双马树脂基复合材料	(121)
5.1.3	聚酰亚胺树脂基复合材料	(123)
5.1.4	氰酸酯树脂基复合材料	(126)
5.2	航空树脂基复合材料成形和制造工艺	(129)
5.2.1	预浸料制备	(131)
5.2.2	传统手工成形	(134)
5.2.3	热压罐成形	(135)
5.2.4	模压成形	(138)
5.2.5	纤维缠绕成形	(139)
5.2.6	树脂传递成形及派生技术	(146)
5.2.7	拉挤成形	(157)
5.2.8	先进热塑性树脂基复合材料成形技术	(159)
5.2.9	航空复合材料成形工艺与制造技术的最新发展	(162)
5.2.10	新型复合材料固化技术	(165)
<b>第6章</b>	<b>金属基、陶瓷基与碳基复合材料</b>	(167)
6.1	金属基复合材料	(167)
6.1.1	金属基复合材料分类	(168)

6.1.2	铝基复合材料	(170)
6.1.3	镁基复合材料	(172)
6.1.4	钛基复合材料	(173)
6.1.5	其他金属基复合材料	(175)
6.1.6	新型的增强形式及其复合材料	(175)
6.1.7	金属基复合材料制备技术	(176)
6.1.8	金属基复合材料的性能特点与应用	(179)
6.2	陶瓷基复合材料	(182)
6.2.1	陶瓷基体和增强体	(182)
6.2.2	相变增韧陶瓷	(184)
6.2.3	颗粒增强陶瓷基复合材料	(185)
6.2.4	晶须补强陶瓷基复合材料	(187)
6.2.5	连续纤维增强陶瓷基复合材料	(188)
6.2.6	仿生层状陶瓷基复合材料	(190)
6.2.7	陶瓷基复合材料的应用	(192)
6.3	碳基复合材料	(193)
6.3.1	碳/碳复合材料制备技术	(193)
6.3.2	碳/碳复合材料性能特点	(194)
6.3.3	碳/碳复合材料应用	(196)
<b>第7章</b>	<b>复合材料的性能表征与测试</b>	<b>(199)</b>
7.1	性能表征与测试的目的与意义	(199)
7.2	树脂基体的表征技术	(200)
7.2.1	红外光谱分析	(201)
7.2.2	凝胶渗透色谱分析	(203)
7.2.3	高效液相色谱分析	(205)
7.2.4	热分析	(205)
7.3	预浸料物理性能表征	(210)
7.3.1	树脂基体	(210)
7.3.2	增强材料	(210)
7.4	预浸料的工艺性能表征	(211)
7.4.1	树脂基体工艺性能	(211)
7.4.2	预浸料工艺性能	(212)
7.5	层压板性能试验	(213)
7.5.1	拉伸试验	(213)
7.5.2	压缩试验	(215)
7.5.3	面内剪切试验	(217)
7.5.4	层间剪切试验	(218)
7.5.5	弯曲试验	(219)
7.6	复合材料结构性能试验	(219)



7.6.1	开孔拉伸和开孔压缩	(220)
7.6.2	层间断裂韧性	(220)
7.6.3	冲击后压缩强度	(222)
7.6.4	树脂基复合材料湿热性能表征	(223)
7.7	复合材料质量评价	(225)
7.7.1	破坏型质量评价	(225)
7.7.2	无损检测 (NDT)	(226)
<b>第8章</b>	<b>功能复合材料与智能复合材料技术</b>	<b>(233)</b>
8.1	电学功能复合材料	(234)
8.1.1	导电复合材料	(234)
8.1.2	压电复合材料	(236)
8.1.3	透波复合材料	(238)
8.1.4	吸波复合材料	(240)
8.2	磁性功能复合材料	(244)
8.2.1	聚合物基磁性复合材料的制备	(245)
8.2.2	磁性复合材料应用	(245)
8.3	光学功能复合材料	(246)
8.3.1	透光功能复合材料	(246)
8.3.2	选择滤光功能复合材料	(246)
8.3.3	光致变色功能复合材料	(246)
8.4	热功能复合材料	(246)
8.4.1	热适应复合材料	(246)
8.4.2	耐热耐烧蚀复合材料	(247)
8.4.3	阻燃复合材料	(249)
8.5	装甲防护功能复合材料	(249)
8.6	梯度功能复合材料	(251)
8.7	智能复合材料	(252)
8.7.1	智能复合材料的工作原理	(252)
8.7.2	几种主要的智能复合材料	(253)
<b>第9章</b>	<b>航空复合材料技术的发展展望</b>	<b>(255)</b>
9.1	飞机新构型、新型飞机与先进复合材料技术集成新应用	(255)
9.2	航空复合材料技术的新发展和新应用	(256)
9.2.1	多功能复合材料及纳米材料技术	(257)
9.2.2	极端性能的超级结构材料	(257)
9.2.3	资源化和环境友好的复合材料技术	(258)
9.3	航空复合材料的数字化模拟与材料基因组技术	(259)
<b>参考文献</b>		<b>(262)</b>