

Commercial
Aircraft
Composite
Technology

商用飞机 复合材料技术

[德] 乌尔夫·保罗·布罗依尔 (Ulf Paul Breuer) 著

程普强 贾欲明 主译

郑锡涛 杨 利 主审

航空工业出版社

商用飞机复合材料技术

Commercial Aircraft Composite Technology

[德] 乌尔夫·保罗·布罗依尔 (Ulf Paul Breuer) 著

程普强 贾欲明 主译

郑锡涛 杨 利 主审

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书针对复合材料结构轻量化设计和制造在商用飞机中的应用进行了介绍。全书共分9章,从总体需求、材料、制造工艺、设计和验证的流程及方法,以及新技术发展等特定领域进行了详尽而全面的描述。其中使用的方法和案例具有很高的参考实用价值。本书可供从事航空复合材料结构设计、制造、检测领域的工程技术人员阅读,也可供高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

商用飞机复合材料技术 / (德) 乌尔夫·保罗·布罗
依尔著; 程普强, 贾欲明主译. -- 北京: 航空工业出
版社, 2019. 4

书名原文: Commercial Aircraft Composite
Technology

ISBN 978 - 7 - 5165 - 1206 - 7

I. ①商… II. ①乌… ②程… ③贾… III. ①民用飞
机-复合材料-研究 IV. ①V229

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 073040 号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01 - 2019 - 2553

Translation from the English language edition:

Commercial Aircraft Composite Technology

by Ulf Paul Breuer

Copyright © Springer International Publishing Switzerland 2016

This Springer imprint is published by Springer Nature

The registered company is Springer International Publishing AG

All Rights Reserved

商用飞机复合材料技术

Shangyong Feiji Fuhe Cailiao Jishu

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话: 010 - 59773006 010 - 85672462

北京隆元普瑞彩色印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2019年4月第1版

2019年4月第1次印刷

开本: 710 × 1000 1/16

印张: 17.25

字数: 367千字

印数: 1—2000

定价: 110.00元

《商用飞机复合材料技术》

编译委员会

主 译：程普强 贾欲明

主 审：郑锡涛 杨 利

译审人员：杨 杰 曾玉铭 高向阳 史红星 刘红武

张 超 王文智 徐 绯 贾利勇 王运锋

韩全民 张 纯 张 璋 刘振东 吴天驰

王立行 杨 戈 张兴国 张 伟

译者的话

碳纤维增强树脂基先进复合材料在航空机体结构中已经得到了迅猛的发展和应用，特别是新研制的型号更是因为整个表面绝大部分都是复合材料而被称为黑色飞机。

由于复合材料与其结构是同时形成的，其开发涉及到材料、制造、检验和结构设计、验证、维护使用等多个专业。相比较金属结构而言，这些专业工作界面互相融合，设计流程相互嵌套而且迭代循环，设计输出互相影响。因此飞机复合材料结构研制有其特点和需求，从而导致各专业之间的界面不再那么明确清晰，各专业的工作交叉重叠且相互影响，所以各专业的工作对其他专业的影响也变得巨大而不易控制。

所以，强调飞机复合材料结构研发的需求分析就显得十分重要。而且需求分析并不是最终目的，也不是仅仅得到需求就行，而是要对需求的合理性和可执行性进行明确和分析。通过对需求的分析要得出产品的最优初步方案并对方案有基本的评价，对影响方案的各要素及其之间相互影响有明确的了解，最终在产品开发时依据各要素进行相关实施和控制。

由于目前飞机复合材料结构的大型化和整体化，设计的要求也越来越高，因此整个复合材料结构研制的风险也变得越来越大。而复合材料结构的设计、工艺、制造、检验、使用、维护的高度一体化集成，也使得任何不成熟的技术在型号研制中的采用将会使型号陷入周期拖延、经费增加，不断反复甚至项目颠覆的严重不利局面。因此针对相关需求和已经出现的新概念、新技术，建立必要的关键技术图谱，进行相应的技术成熟度分析和管理，并据此指导基础研究、预先研究、关键技术攻关、演示验证工作，以保证型号研制时高效而相对安全的研究工作是很有必要的。

需求分析以及技术成熟度评价都是我们国内目前在预先研究项目和型号工程发展中迫切需要的重要工具。我们发现德国凯撒斯劳滕工业大学 Ulf Paul Breuer 教授编写的《商用飞机复合材料技术》一书从复合材料的特性出发，

从整个飞机的需求，材料的需求对面向制造的复合材料轻质结构设计和实践进行了深入浅出的介绍。特别是书中提到的一些思路和方法对构建需求分析和成熟度评价体系具有很大的参考意义。

“恰当的材料用在适当的位置”，Ulf Paul Breuer 教授形象而准确地总结揭示了飞机设计的根本需求。我强烈推荐各位对飞机复合材料设计、制造技术感兴趣的工程技术人员以及院校师生阅读本书。

4号唐强

2019 年 2 月

前 言

本书内容基于我的讲稿《商用飞机复合材料技术》，旨在加深德国凯撒斯劳滕工业大学机械工程学院硕士研究生在复合材料性能及优化制造轻量化设计方面的理解。本书仅对特定领域进行了详尽而全面的描述。我把重点放在业界对于航空器明确的材料要求这一中心主题上，并且突出相较于常规材料而言碳纤维增强树脂基复合材料（CFRP）最重要的优点和面临的挑战。在产品研发过程中，尽早确定“合适的材料用在合适的位置”是至关重要的。因此，了解开发过程、主要认证流程、里程碑式的节点以及系统的详述需求是必要的。材料性能的验证过程会详细介绍。所有最先进的制造技术，包括未来技术的展望都会在书中介绍。特别是对于复合材料来说，了解设计体系、制造技术和最终的材料性能三者之间的相互关联是很关键的。在本书中，我以特定案例着力研究了先进碳纤维增强树脂基复合材料设计机体承载结构的一些关键问题。此外，我用一个章节来介绍材料的验证过程，当然还有关于维修的内容。

随着诸如碳纤维增强树脂基复合材料的高性能复合材料在其他行业领域的应用，尤其是汽车行业、机械制造、风力发电、建筑行业、运动休闲领域和医疗行业，本书对于从事上述领域工作的学生和工程师也是有很大帮助的。

本书以我们在德国复合材料研究所（IVW）研究的未来飞行器的最新发展的展望作为结束。最后一章由我的研究助手提姆·克洛布（Tim Krooß）（PPS - PES 混合，以低成本使材料性能接近 PEEK），本尼迪克·汉尼曼（Benedikt Hannemann）（碳/金属混合材料，使材料具有导电性并改善材料的失效性能）和莫里兹·哈布勒（Moritz Hübler）（在纤维增强树脂结构中加入形状记忆合金制造变体结构）撰写。

诚挚感谢我的老同事和朋友们对本书认真细致地校对，感谢他们提供的珍贵的改进意见。

Ulf Paul Breuer
德国，凯撒斯劳滕
2016 年春

缩 略 语

缩写	全 称	译 文
A/B	airbrakes	减速板
A/C	aircraft	航空器, 飞机
acc.	according	依据 (参考)
ACD	aircraft certification documents	飞机认证文件
ADL	allowable damage limit	允许损伤极限
A_F	austenite finish temperature	奥氏体终轧温度
AFP	automated fibre placement	自动纤维铺放
Aft	rear, back	后, 后部
AITM	Airbus Industries test method	空客公司试验方法
Al	aluminium	铝
ALI	airworthiness limitation items	适航限制项目
AMC	acceptable means of compliance	可接受的符合性方法
AMM	aircraft maintenance manual	飞机维修手册
approx.	approximately	大约
Ar	argon	氩
A_s	austenite start temperature	奥氏体转变温度
ATA	Air Transport Association	(美国) 航空运输协会
ATL	automated tape laying	自动铺带
Au	aurum (gold)	金
bbl	barrel of oil (359L)	一桶原油 (原油计量单位)
BBL	body buttock line (fuselage width - wise position)	机身对接线 (机身环向位置)
BS	body station (fuselage lengthwise position)	机身站位 (机身航向位置)
BVID	barely visible impact damage	目视勉强可见冲击损伤
BWL	body water line (fuselage height - wise position)	机身水平线 (机身高度方向位置)
C	carbon	碳

表（续）

缩写	全 称	译 文
CAD	computer – aided design	计算机辅助设计
CAGR	compound annual growth rate	综合年增长率
CAI	compression after impact	冲击后压缩
CB	cross beam	横梁
CF	carbon fibre	碳纤维
CF/EP	carbon fibre/epoxy	碳纤维/环氧树脂
CFRP	carbon fibre reinforced plastic	碳纤维增强树脂基复合材料
CMR	certification maintenance requirements	认证维护要求
Conf.	configuration	构型
cont.	continued	继续
cpt	cured ply thickness	单层固化厚度
CRC	corporate research centre	联合研究中心
CRI	certification review items	认证审核项目
CTE	coefficient of thermal expansion	热膨胀系数
Cu	copper	铜
CWB	centre wing box	中央翼盒
DEA	dielectrical analysis	介电分析
DMTA	dynamic mechanical thermal analysis	动态热力学分析
DOC	direct operating cost	直接运营成本
DSC	differential scanning calorimetry	示差扫描量热法
DSG	design service goal	设计服役目标（使用寿命）
EADS	European Aeronautic Defense and Space Company	欧洲宇航防务集团
EAS	equivalent air speed	等效空速
EASA	European Aviation Safety Agency	欧洲航空安全局
EIS	entry into service	投入使用
EKDF	environment knock down factor	环境衰减因子
EP	epoxy	环氧（树脂）
ERF	electrorheological fluid	电流变液体

表 (续)

缩写	全 称	译 文
ESG	extended service goal	扩展服役年限
ESN	electrical structural network	电气结构网络
F/S	front spar	前梁
FAA	Federal Aviation Administration	(美国) 联邦航空局
FAL	final assembly line	总装线
FAR	Federal Aviation Regulations	(美国) 联邦航空条例
FAW	fibre areal weight	纤维单位面积质量
FC	flight cycle	飞行起落
FE	finite element	有限元
FEA	finite element analysis	有限元分析
FEM	finite element method	有限元法
FH	flight hour	飞行小时
FHC	filled hole compression (strength)	充填孔压缩 (强度)
FHT	filled hole tension	充填孔拉伸
FML	fibre metal laminate	纤维金属层合板
FRP	fibre - reinforced plastic	纤维增强树脂基复合材料
FST	fire (or flammability) smoke toxicity	燃烧烟雾毒性
FSW	friction stir welding	搅拌摩擦焊
FT, F/T	flap track	襟翼滑轨
FTF	flap track faring	襟翼滑轨整流罩
FTI	flight test installation	飞行试验装置
FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy	傅里叶变换红外光谱
FWD	forward	前部
GF	glass fibre	玻璃纤维
GFRP	glass fibre reinforced plastic	玻璃纤维增强树脂基复合材料
GLARE	glass laminate aluminium reinforced epoxy	玻璃纤维增强铝合金层合板
GSE	ground support equipment	地面保障设备
H/S	high speed	高速

表 (续)

缩写	全 称	译 文
H/W	hot/wet (condition)	湿热 (环境)
HT	high tensile strength	高拉伸强度
HFEC	high frequency eddy current	高频涡流
HM	high modulus	高模量
HMS	high modulus/high strength	高模量/高强度
HST	high failure strain	高失效应变
HTP	horizontal tail plane	水平尾翼
ICAO	International Civil Aviation Organization	国际民航组织
IE	impulse echo	脉冲回波
ILSS	interlaminar shear strength	层间剪切强度
IM	intermediate modulus	中模量
IPS	individual product specification	单篇产品规范
IR	infrared	红外 (线)
ISO	International Organization for Standardization	国际标准化组织
IVW	Institute für Verbundwerkstoffe	德国复合材料研究所
JAA	Joint Aviation Authorities	欧洲联合航空局
JAR	Joint Aviation Requirements	欧洲联合航空要求
JIT	just in time	准时制生产
L	longitudinal	纵向
L/S	low speed	低速
LBW	laser beam welding	激光焊接
LDC	large damage tolerance	高损伤容限
LEF	load elevation factor	负载高程因子
Li	lithium	锂
LL	limit load	限制载荷
LM	low modulus	低模量
LSP	lightning strike protection	雷电防护
LT	longitudinal transversal	纵横向

表 (续)

缩写	全 称	译 文
MAC	mean aerodynamic chord	平均气动弦长
MCFRP	metal – carbon – fibre – reinforced polymer	金属/碳纤维增强聚合物
MCS	multifunctional control surfaces	多功能操纵面
MEK	methyl ethyl ketone (cleaning agent)	丙酮 (清洗剂)
MF	metal fibre	金属纤维
Mg	magnesium	镁
MG	master geometry	部件几何尺寸 (主 (骨架) 几何模型)
Mini – TED	mini – trailing edge device	微型后缘设备
MLG	main landing gear	主起落架
MoC	means of compliance	适航符合性方法
MP	maintenance programme	维护程序
MPD	maintenance planning document	维护大纲文件
MRO	maintenance, repair and overhaul	维护、修理和大修
MS	material specification	材料规范
MTOW	maximum take – off weight	最大起飞重量
MVI	modified vacuum infusion process	先进的真空熔渗工艺
MWE	manufacturing weight empty	制造空重
MWNT	multi – walled carbon nanotubes	多壁碳纳米管
MZFW	maximum zero fuel weight	最大零燃油重量
NC	numerical control	数控
NCF	non – crimp fabric	无屈曲织物
NDT	non – destructive testing	无损检测
NGA	next generation aircraft	下一代飞行器
NLG	nose landing gear	前起落架
NRC	non – recurring cost	非经常性成本
OC	operating cost	运营成本
OHC	open hole compression	开孔压缩
OHT	open hole tension	开孔拉伸

表（续）

缩写	全 称	译 文
PAN	polyacrylnitrile	聚丙烯腈
Pax	passengers	乘客
PB	plumbum (lead)	铅
PEEK	polyetheretherketon	聚醚醚酮
PES	polyethersulfone	聚醚砜
PLB	pin loaded bearing (strength)	销（钉）轴挤压（强度）
PLB ult.	pin loaded bearing ultimate (strength)	销（钉）轴挤压极限（强度）
PLC	plain loaded compression	平面压缩
PLT	plain loaded tension	平面拉伸
PPS	polyphenylene sulfide	聚苯硫醚
ProHMS	prozesskette hochauftrieb mit multifunktionalen Steuerflächen	高升程工艺链及多功能操纵面
PZT	lead zirconate titanate	锆钛酸铅
QA	quality assurance	质量保证
R curve	residual strength curve	剩余强度曲线
R&D	research and development	研究与发展（研发）
R/S	rear spar	后梁
RC	recurring cost	经常性成本
RF	reserve factor	储备因子
RFI	resin film infusion	树脂膜熔渗
RI	resin infusion	树脂渗透
RI	repeated interval	重复间隔
RPB	rear pressure bulkhead	后压力框
RPK	revenue passenger kilometres	乘客里程收入
RT	room temperature	室温
RTM	resin transfer moulding	树脂传递模塑
RTM6	special HexFlow® Hexcel Resin (Epoxy) for resin transfer moulding	树脂传递模塑专用赫氏树脂

表 (续)

缩写	全 称	译 文
SAM	space allocation model	空间分配模型
Sc	scandium	钪
SEM	scanning electron microscopy	扫描电镜
SF	safety factor	安全因数 (旧称安全系数)
SFRP	steel fibre reinforced plastic	钢纤维增强塑料
SHM	structural health monitoring	结构健康监测
Si	silicium	硅
SMA	shape memory alloy	形状记忆合金
SRM	Structural Repair Manual	结构修理手册
SW	sandwich	夹层
T	transversal	横向
T/C	ratio air foil thickness to chord ratio	翼型相对厚度
T/E	trailing edge	后缘
tbd	to be determined (or; to be defined)	待定
TC	type certification	型号认证
TEM	scanning tunneling electron microscopy	扫描隧道电子显微镜
tex	unit of measure for the mass per length of rovings or yarns, 1 tex = 1g/1000m	单位长度纱线的质量, 1tex = 1g/1000m
Ti	titanium	钛
T - L	transversal - longitudinal	横向 - 纵向
TP	thermoplastic	热塑性
TS	technical specification	技术规范
TTU	through transmission ultrasound	超声波穿透法
UAV	unmanned air vehicle	无人机
UD	unidirectional	单向的
UL	ultimate load	极限载荷
UN	United Nations	联合国
US	United States	美国

表 (续)

缩写	全 称	译 文
UV	ultraviolet radiation	紫外线辐射
V&V	validation and verification	确认和验证
VAP®	vacuum assisted process	真空辅助工艺
VDI	Verein Deutscher Ingenieure	德国工程师协会
VID	visible impact damage	目视可见冲击损伤
Vol.	volume	体积
VSDI	visual special detailed inspection	特别详细目视检查
VTP	vertical tail plane	垂直尾翼
XPS	X – ray photoelectron spectroscopy	X 射线光电子能谱
Zn	zinc	锌

符 号

符号表示	释 义	译 文
A	area	面积
a	crack length	裂纹长度
b_F	specific fuel burn	比油耗
C_D	coefficient of drag	阻力系数
C_L	coefficient of lift	升力系数
d	diameter	直径
da/dN	crack growth rate	裂纹扩展速率
ε	strain	应变
E	elastic modulus	弹性模量
F, f	force	力
F_{tu}	force tensile ultimate	拉伸极限载荷
F_{ly}	force tensile yield	拉伸屈服载荷
G	gravity force	重力
g	earth acceleration	重力加速度
G_{IC}	fracture toughness	断裂韧性
k	stress intensity factor	应力集中因子
κ	specific electrical conductivity	比电导率
L	lift force	升力
M	momentum	力矩
m	mass	质量
m_F	fibre mass content	纤维质量含量
N, n	number	数值
n_Z	load factor (number to multiply with g , earth acceleration)	载荷因数 (又称过载)
p	pressure	压力 (压强)

表 (续)

符号表示	释 义	译 文
Δp	delta pressure	压力变化
R	range	域 (范围)
R	residual strength	剩余强度
S	electrical conductivity	电导率
ρ	density	密度
σ	stress	应力
τ	shear stress	切应力
T	temperature	温度
t	thickness	厚度
T_g, T_G	glass transition temperature	玻璃化转变温度
V	volume	体积
v	velocity	速度
v_C	velocity during cruise	巡航速度
v_D	diving velocity	俯冲速度
v_F	fibre volume fraction	纤维体积含量
v_f	velocity flaps	襟翼速度
v_{fe}	velocity flaps fully extended	襟翼放下速度
w	width	宽度