



“十三五”国家重点图书出版规划项目
先进复合材料技术丛书

STRUCTURAL FRAMEWORK FOR FLIGHT:
NASA'S ROLE IN DEVELOPMENT
OF ADVANCED COMPOSITE MATERIALS FOR
AIRCRAFT AND SPACE STRUCTURES

飞行器机体结构： NASA 在航空航天先进 复合材料结构研发中的作用

达雷尔·R. 坦尼 (Darrel R. Tenney)

小约翰·G. 戴维斯 (John G. Davis, Jr.)

[美] 诺曼·J. 约翰斯顿 (Norman J. Johnston) 著

R. 拜伦·派普斯 (R. Byron Pipes)

杰克·F. 麦圭尔 (Jack F. McGuire)

陈祥宝 译

航空工业出版社



“十三五”国家重点图书出版规划项目
先进复合材料技术丛书

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLISHING FUND PROJECT

飞行器机体结构： NASA 在航空航天先进复合 材料结构研发中的作用

**Structural Framework for Flight: NASA's Role in
Development of Advanced Composite Materials
for Aircraft and Space Structures**

达雷尔·R. 坦尼 (Darrel R. Tenney)

小约翰·G. 戴维斯 (John G. Davis, Jr.)

[美] 诺曼·J. 约翰斯顿 (Norman J. Johnston) 著

R. 拜伦·派普斯 (R. Byron Pipes)

杰克·F. 麦圭尔 (Jack F. McGuire)

陈祥宝 译

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书总结凝练了过去40多年NASA兰利研究中心在先进复合材料及结构方面的经验和教训,指出了复合材料在未来飞行器中进一步应用存在的主要阻力、挑战和机遇,这些对于引领和指导未来先进复合材料的研究、促进飞行器材料及结构的革命性的变化是非常有价值的。NASA兰利研究中心在先进复合材料及结构研究的历史是其发展和应用的历史。译者将本书奉献给国内广大读者的目的是希望读者能够以史为鉴从中得到一些有益的启迪。

本书适合从事飞机设计以及复合材料研究和应用的人士阅读,也可供其他航空航天领域的工程人员参考,还可作为航空航天类高等院校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

飞行器机体结构: NASA在航空航天先进复合材料结构研发中的作用 / (美)达雷尔·R.坦尼

(Darrel R. Tenney)等著;陈祥宝译. --北京:航空工业出版社,2017.7

(先进复合材料技术丛书)

书名原文: Structural Framework for Flight;

NASA's Role in Development of Advanced Composite Materials for Aircraft and Space Structures

ISBN 978-7-5165-1241-8

I. ①飞... II. ①达... ②陈... III. ①飞行器—飞机机体—复合材料结构—研究 IV. ①V47

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第164016号

飞行器机体结构: NASA在航空航天先进复合材料结构研发中的作用
Feixingqi Jiti Jiegou: NASA zai Hangkong Hangtian Xianjin Fuhe
Cailiao Jiegou Yanfa zhong de Zuoyong

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: 010-84936597 010-84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2017年7月第1版

2017年7月第1次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 28.25

字数: 724千字

印数: 1—2500

定价: 148.00元

丛书前言

先进材料是科学技术发展和国民经济建设的重要支柱。先进复合材料作为一类轻质高效、节能环保的新型材料，在先进材料领域具有极其重要的地位。自 20 世纪 60 年代问世以来，先进复合材料始终是世界各国重点研究开发的关键材料之一，近年来更是备受青睐与重视，在世界各国的军民用领域，尤其是航空领域起到了至关重要的作用。先进复合材料的用量已经成为航空结构先进性的重要标志，大型飞机波音 787、空客 A350 的先进复合材料用量达到 50% 以上，展示了其令人鼓舞的发展前景。此外，先进复合材料在基础设施、沿海油气田、风力发电、汽车和体育用品等民用工业领域的广泛应用，向人们昭示了其蓬勃发展的未来。

国内先进复合材料的发展应用已有 30 多年的历史，在此过程中获取了大量的性能数据，也积累了大量的设计使用经验。目前先进复合材料继续向高性能化、多功能化和尖端化发展，并向民用领域快速渗透和规模扩张，产业进入应用扩张带动成本持续降低的新阶段。为了适应这一发展需求，我们组织国内先进复合材料领域有实际经验的专家，吸取了国外的先进经验，汇总了国内外最新的研发成果，旨在为国内提供一套全面、系统并具有工程应用

价值的“先进复合材料技术丛书”。考虑到目前先进复合材料的规模和成熟程度，“先进复合材料技术丛书”的内容主要针对先进树脂基复合材料，涵盖先进树脂基复合材料技术基础、制造技术、性能表征、使用维护以及适航审定等最新成果。

对于 21 世纪的企业，其成功不仅仅是利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势，而利用拥有的知识带动和促进产业的跨越更是一种挑战和责任。把拥有的知识用书面文字的形式呈现出来，构建一个公共资料库和交流平台，让更多的人从中受益，为产业的跨越提供支撑——这就是中航复合材料有限责任公司、中国复合材料学会和航空工业出版社出版这套“先进复合材料技术丛书”的初衷。

相信这套丛书的出版，会使更多的复合材料科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力我国复合材料产业的自主创新，对复合材料产业的科技进步产生积极影响。

中国工程院院士
中国复合材料学会理事长 陈祥宝
“先进复合材料技术丛书”主编

译者的话

先进复合材料具有优异的使用性能，自 20 世纪 60 年代问世以来始终是世界各国重点研究开发的关键材料之一。先进复合材料的用量已经成为航空结构先进性的重要标志，大型飞机波音 787、空客 A350 先进复合材料用量达到 50% 以上，展示了其令人鼓舞的发展前景。

《飞行器机体结构：NASA 在航空航天先进复合材料结构研发中的作用》一书总结凝练了过去 40 多年 NASA 兰利研究中心在先进复合材料及结构研究方面的经验和教训，指出了复合材料在未来飞行器中进一步应用存在的主要阻力、挑战和机遇，这些对于引领和指导未来先进复合材料的研究，促进飞行器材料及结构的革命性的变化是非常有价值的。NASA 兰利研究中心在先进复合材料及结构研究的历史是复合材料发展和应用的历史。译者将本书奉献给国内广大读者的目的是希望读者能够以史为鉴从中得到一些有益的启迪。

本书第 1 ~ 第 2 章、第 18 ~ 第 20 章由陈祥宝翻译，第 3 章和第 10 章由李亚锋翻译，第 4 章由李雪芹翻译，第 5 ~ 第 6 章由石峰晖翻译，第 7 章和第 9 章由彭公秋翻译，第 8 章由李国丽翻译，第 11 章由张朋翻译，第 12 章由张代军翻译，第 13 ~ 第 14 章由郭妙才翻译，第 15 ~ 第 17 章由赵澎湃翻译。全书由陈祥宝和纪艳玲进行了统一校正修改。

译者特别感谢航空工业出版社为了获得本书出版权所做的努力，正是他们的努力使本书获得在国内出版。

由于译者水平有限，错误和不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

译者
2015 年 8 月

致 谢

感谢 NASA 兰利研究中心对本书编写的支持。特别感谢兰利研究中心查尔斯·E. 哈里斯 (Charles E. Harles) 博士、理查德·D. 扬 (Richard D. Young) 博士和卡伦·S. 惠特利 (Karen S. Whitley) 博士的支持、批评和有益的建议及提供的技术报告。也特别感谢分析服务和材料部琼·兰克斯 (Jean Lankes) 女士在本书编写过程中提供的无私的支持。同时也特别感谢分析服务和材料部主席贾兰施·昂纳姆 (Jalaiah Unnam) 博士在本书编写过程中给予的支持和帮助。

特别感谢约瑟夫·海曼 (Joseph Heyman) 博士撰写了本书的无损检测评价 (NDE) 章节, 以及威廉·H. 普罗瑟 (William H. Prosser) 在 NDE 章节撰写时给予的支持。作者也特别感谢菲利普·扬 (Philip Young) 博士对于本书材料化学特性部分的贡献。也由衷地感谢肯尼思·马修·塔潘 (Kenneth Matthew Tappan) 在本书文献研究中提供的完美工作。

我也想感谢 AS&M 技术团队的无私支持和努力工作, 他们在本书的编写中付出了辛勤的劳动。技术团队的成员包括达雷尔·R. 坦尼 (Darrel R. Tenney) 博士、小约翰·G. 戴维斯 (John G. Davis, Jr.) 博士、诺曼·J. 约翰斯顿 (Norman J. Johnston) 博士、R. 拜伦·派普斯 (R. Byron Pipes) 博士和杰克·F. 麦圭尔 (Jack McGuire) 先生。我也想对诺姆·约翰斯顿 (Norm Johnston) 博士将由杰出的高分子化学家和工程师研发的大量创新树脂和复合材料成果整理成文所付出的大量辛劳表示特别的感谢。

最后, 向所有 NASA 兰利 (Langley) 研究中心的材料与结构科学家和工程师, 航空航天工业界的合作伙伴, 以及在国家宇航管理项目支持下为先进复合材料发展做出贡献的大学教授和学生们的致谢。也向在兰利研究中心复合材料发展的 40 多年中进行了大量试验工作的技术人员, 以及负责复合材料试样加工和设备维护的工作人员表示感谢。

达雷尔·R. 坦尼 (Darrel R. Tenney) 博士
汉普顿, 弗吉尼亚
2010 年 9 月 15 日

原 书 序

本书出版有多个目的。首先，本书作为过去 40 年（美国）国家航空航天局（NASA）兰利研究中心复合材料研究完整的信息源，可为希望了解先进复合材料在新概念飞行器中应用所遇到的挑战的读者提供关键参考。其次，本书给出了先进飞行器发展和应用先进复合材料所遇到的主要障碍，以及克服这些障碍的经验和教训。再次，本书指出了复合材料在未来飞行器中进一步应用存在的主要阻力、挑战和机遇，这些对于引领未来的研究是非常有价值的。新材料或新工艺的突破可以消除/减少复合材料在新结构或新概念飞行器中扩大应用的某些关键障碍。最后，通过系统全面总结过去的工作和明确未来挑战将有助于激励新的研究和发展革命性的新材料和新结构，以促进未来的飞行器革命性的变化。《飞行器机体结构：NASA 在航空航天先进复合材料结构研发中的作用》一书的具体目标如下。

（1）获取知识

选择复合材料知识库内兰利研究中心或兰利拨款资助的合同者近 40 年中所进行的研究工作总结凝练成本书。从 1970 年至 2010 年，NASA 复合材料结构和材料研究发展的基础技术，使复合材料成熟到可在航空器和航天器的主结构应用，实现了改善飞行器性能、降低重量^①和成本的目的。NASA 研究工作的数千份技术报告已经公开发表和在国内国际会议上交流。这些报告的作者包括：NASA 研究人员、由 NASA 资助和与 NASA 合作的大学的研究人员、在其他政府研究实验室的合作研究人员，以及由 NASA 资助的工业界研究人员。虽然已经出版了多部介绍 NASA 在气动和飞行器系统方面研究成果的专著，但出版介绍有关兰利研究中心和（或）资助完成的先进复合材料的结构和材料方面研究成果的专著尚属首次。

（2）经验教训

在 40 年复合材料研究的过程中，兰利在研究方法和先进复合材料基础研究中取得了许多经验，主要包括成功完成研究目标的经验或没有满足计划里程碑的主要因素。

（3）技术成熟度评价

用于新概念运输工具，未来新的空间探索或新型空间科学仪器应用的复合材料技术成熟度评价研究，这些信息对于高回报项目的立项选择是非常有价值的。

（4）确定未来的最大挑战

这一研究确定了扩大轻质复合材料结构在未来新型航空器和航天器、空间科学研究用高性能空间设备和空间探测火箭应用的主要技术挑战。

本书的主要内容：复合材料在航空器和航天器的成功应用，NASA 在每个不同类型飞

^① 本书中的重量概念均指质量（mass）。——译者注

飞行器复合材料应用中所起的作用，以及每个研究领域的主要进展。在每一章最后附有关键的人物和精选的参考文献。这些参考文献可为技术专家和希望更深入了解章节所述内容的人员提供进一步的信息。在每一章中，同时强调了经验教训和未来的挑战，以帮助复合材料研究和管理人员，以及指导未来有关先进复合材料的研究。

NASA 兰利复合材料研究报告摘要

在过去 40 年中，兰利研究中心所进行的有关复合材料研究为复合材料在航空航天以及其他领域的应用做出了杰出的贡献。在本书中作者试图基于兰利研究中心在复合材料和结构方面所做的研究，全面总结兰利研究中心在这方面的主要贡献和经验教训。由于在复合材料研究项目结题时已经做了凝练和总结，因此这项工作难度非常大。本书的部分内容来自直接从事复合材料研究或者从事复合材料研究项目和（或）计划管理的作者的经验积累，部分内容来自对文献和兰利资助研究项目形成的研究报告的全面分析研究，另外部分非常有价值和重要的内容由目前已经退休和正在从事复合材料结构关键技术研究的科研人员提供。

在本书各章中均有一节为经验教训的详细介绍。在大部分情况下作者试图将来自本书不同章节的多个经验教训综合提升至更高水平。然而这些综合的评论不能取代在每一节末尾的详细的经验教训介绍。

基于复合材料和结构研究分析结果，提出了先进复合材料和结构在未来飞行器和运载工具近期和远期应用面临的重大挑战。这些以经验教训为基础总结的重大挑战，可以给正在从事或将来从事与先进复合材料相关的技术人员和管理者一定的指导。

(1) 主要贡献

①飞行服务。兰利引导和促进商用飞机工业、航空公司和美国联邦航空局（FAA）支持在商用飞机上大量应用先进复合材料。通过次结构部件的制造和长期飞行试验这一目标得以实现，其成功的关键是 NASA、工业界和 FAA 在复合材料结构研究方面，以及实际飞行考核的适航认证方面建立了良好的合作关系。

②教育培训。兰利和多所大学进行了实质性的合作，实施了研究生水平的复合材料教育计划，以培养先进复合材料技术领域急需的研究人员。这些研究生被 NASA、工业界和另外一些政府部门雇用，成为复合材料发展的主要贡献者。教育培训方面成功的例子是 NASA—弗吉尼亚理工大学的复合材料培养计划。

③基础技术研发基地。兰利研发基地和重点项目是基础技术组成部分的主要研发基地。基础技术研发基地主要研究可用于飞行和空间运载主结构的相关技术，包括材料行为、制造技术、试验方法、检测技术、结构分析和环境影响。试验件的尺寸从试样、元件级直至 40ft^① 大的半个机翼。

④对适航认证的支撑。影响飞行安全性技术问题的解决方案由兰利和 FAA 密切合作予以解决。这些包括试验标准的建立、检测判据、分析代码以及另外一些保证复合材料结构适航的方法。FAA 的复合材料专家参加到 NASA 技术委员会作为一个团队共同开展工作。

① 1ft = 0.305m。——译者注

⑤失效预测方法。兰利率先将“积木式”方法研究和复合材料缺陷形成和扩展研究相结合，发展了整体/局部分析程序，涉及从原子水平的连续模拟分析到大尺寸结构件的有限元建模分析。

⑥损伤容限。兰利发展建立了冲击和复合材料剩余强度之间关系。非可见冲击损伤对压缩强度影响的重要性导致韧性复合材料体系的发展，目前应用的复合材料大部分是韧性复合材料。从脆性环氧复合材料到韧性复合材料的转变克服了复合材料在飞机主结构应用的最大障碍。兰利同时率先开展了复合材料缝编技术的研究，通过厚度方向的缝合明显改善结构的损伤容限，限制了分层和加筋的剥落。

⑦环境影响。兰利研发基地和重点项目组成的基础技术研发基地被要求开展湿度、燃油、液体、紫外光和日照对复合材料影响的预测，包括短期和长期地面曝晒、飞行和空间（LDEF）试验、剩余强度试验以及预测材料性能影响的分析模型的建立。

⑧高温树脂和胶黏剂合成。兰利率先发展了空间运载、超声速和高速飞机可能应用的树脂和胶黏剂。研究工作包括分子建模、配方、工艺研究和性能表征，多个配方已经作为 LARC 系列产品注册，苯乙炔基封端酰亚胺系列（PETI）已经实现商品化。

⑨抗坠毁。兰利和美军航空航天结构理事会合作，领导了飞机和直升机复合材料结构的吸能研究，确定了下地板结构的基本失效和抗坠毁模型，发现石墨纤维/环氧复合材料结构比铝合金有更高效率的吸能能力。在 NASA 兰利研究中心动态冲击研究室进行了贝尔（Ball）和西科斯基（Sikorsky）“先进复合材料飞机框架计划”（ACAP）直升机和全复合材料通用飞机的抗坠毁试验。

⑩自动化制造。对于可降低成本和提高复合材料质量的自动化制造工艺，NASA 兰利是领导者和支持者，其主要贡献包括：发展了先进的机翼半自动缝编设备，使用缝编设备制造框架和壁板，树脂配方优化以满足丝束铺放要求，树脂膜熔渗工艺的建模。这些自动化制造技术在波音 787 和空客 A380 飞机复合材料构件制造中得到体现。

⑪无损检测评价（NDE）。兰利一直是这一领域的领先者，和 FAA 及工业界一起确定了合适的 NDE 技术，建立了飞机复合材料结构件的适航要求。兰利率先发展了能够预测各种无损检测技术检测能力的基本物理模型，如射线、超声、热成像、电磁散斑和光学。兰利建立了微焦 X 射线 CT 系统，该系统有 12.5 μm 的图像分辨率，可定量检测孔隙率、缝编材料、夹杂、脱黏、材料缺失和另外一些微观缺陷。

⑫石墨纤维风险分析。兰利负责了一个评估民航飞机事故中石墨纤维对人员救助的潜在冲击的国家项目。如果潜在商业、法律和军事影响很大，那么必须停止复合材料在民用飞机的进一步应用。兰利研究人员进行了三年分析和试验观察，提供的科学结论表明这种威胁并不是问题。

（2）主要经验教训

兰利在过去 40 年中针对先进复合材料进行了极其富有成效的研发，下面是主要经验教训：

①领导作用。早在 1970 年，兰利（理查德·海德菲尔斯）和 NASA 总部（阿伦·爱拉斯）的主要领导者认为复合材料是将明显改善宇航结构性能的革命性新技术（新 S 曲线），他们承诺对这项新技术以非常及时的方式进行资源和人力的投资，这是兰利在复合材料方面做出重大贡献的基础。

②持续支持。兰利在近 40 年中持续支持了复合材料的研发项目。

- a. 进行了出色的研究并长期跟踪完成良好的项目；
- b. 作为工业界、大学和其他政府部门的合作者参与计划制订和项目实施研究的全过程；
- c. 进行了高效的项目管理，组织项目执行过程的里程碑和结题交付会议；
- d. 与 NASA 管理委员会合作以获得部门优先资助，与技术委员会合作以得到工作指导和技术评价。

③成功建模。成功建模是持续研究和技术基础项目及焦点技术项目相结合的成果。基础项目和焦点项目的结合可以解决基础研究项目中的长远科学问题和近期要有较高技术成熟度水平（TRL）和工业界急需的关键技术。这种结合推动了资金、设施和人员的高效使用。

④积极主动的教育和培训。主动教育（NASA—弗吉尼亚理工大学的复合材料技术项目及其他）和培训是一个新技术领域前进的关键因素。兰利的研究人员积极参与了新学科的技术团体和特殊专门领域技术组织的建立和活动。

⑤多学科研究。多学科研究能够解决超出单学科领域的一些技术难题。事实上，聚合化学和结构力学的相互交叉研究非常成功地解决了损伤容限问题。

⑥“积木式”研究。“积木式”研究已经用于复杂结构失效预测。失效预测分析建模和试验验证相结合是关键因素，也是兰利成功进行“积木式”研究的关键。

⑦结构分析。新的分析规范和能力的发展是在新的技术领域获得新的洞察力和对新现象本质了解的关键因素。已有的规范已经不能满足需求，计算能力和速度的进一步增强将使人们能够发展新的分析规范以满足更复杂应力状态的分析。

⑧编织技术。和相邻专业协同研究是一种融入新概念和解决复合材料研究的方法。典型的例子包括由制药工业发展的分子建模算法的应用和由纺织工业发展的石墨纤维预成形体的编织技术的应用。

⑨计划调整。没有一个复合材料项目仅在初始计划资助下就可以全部完成。大部分中间阶段成果需要认真考虑进一步安排，如果大部分研究内容仍然需要进一步深入研究，那么项目需要重新安排，获得追加的资助。

⑩数据存档。所有项目计划的综合部分是关键数据获得和存档的计划和规范。一般“手递”关键数据、试验规范，或另外一些关键信息，对于项目下一个研究者来说，这些归档数据是不够的。在人员变动、转移和清理阶段会导致数据、试样以及在某些情况下，试验卡具的丢失。

⑪人员流动。必须建立鼓励研究人员在基地之间、焦点研发项目之间的流动环境。

⑫新的挑战。为满足伴随未来革命性飞行器对性能和安全要求带来的挑战和机遇，兰利必须在结构材料领域进行创新性研究。“重大挑战”计划团队需要寻找下一代“S 曲线”机会的新技术和确定支持新发明必须得到的回报收益。

(3) 重大挑战

本书前 18 章将讨论 9 个不同的“重大挑战”方向，具体如下：

- ①分析认证。
- ②设计材料：多尺度建模和表征。

- ③高精度失效预测：微观和纳米尺度力学。
- ④纳米复合材料：多功能材料体系。
- ⑤智能材料和结构：更大、更集成化的结构。
- ⑥通用复合材料知识和经验：各向同性塑性思维。
- ⑦可靠性设计。
- ⑧非热压罐、低压固化材料体系。
- ⑨“谷歌时代”的研究。

推荐对“重大挑战”进行进一步研究以确定最需要、最值得支持的新结构和新材料的研发，这些新结构和新材料能够引领和支撑下一代航空器和航天器结构发生革命性变化。为了保证新的革命性技术研究的开展，要求在人员和装备方面每年4000万~5000万美元的资助水平。

上述每一“重大挑战”都将要进一步的研究，我们团队坚信纳米增强智能复合材料将是未来复合材料技术主要进步的强有力候选者之一。纳米增强体的应用有可能将复合材料力学性能提高一个数量级。纳米电子器件是一个新的领域，分子计算即将出现。聚合物基体能够包含“智能链段”，它们能够感知、感觉、思考、储存数据以及对环境变化做出反应。复合材料能够有智能的皮肤，能够探测非常轻微的冲击的发生，能够记录冲击的程度和从冲击位置产生损伤并扩展的过程，并可以将这些数据传输至所装载的智能系统。复合材料不仅是结构承载，也是一个智能感应、响应的结构系统，这样可扩展飞行器的性能和安全性。从现在的复合材料到纳米增强智能复合材料之间的差距是一个新的技术“S曲线”，兰利处于资助和领先的位置。材料和结构领域的研究将再次活跃，这使人想起在20世纪70年代早期兰利研究中心停止了铝合金结构的研发工作，把主要精力集中于石墨纤维增强树脂基复合材料研究的情景。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
第 2 章 成功的故事和 NASA 兰利的作用	(3)
2.1 商用运输机	(3)
2.2 通用飞机	(7)
2.3 战斗机	(8)
2.4 军用运输机	(11)
2.5 直升机	(12)
2.6 地球和空间科学飞机	(16)
2.6.1 环境研究飞机和传感技术	(16)
2.6.2 “太阳神”飞机失事调查	(18)
2.6.3 火星飞机	(19)
2.7 空间发射飞行器	(20)
2.8 空间结构	(22)
参考文献	(24)
第 3 章 NASA 参与的复合材料研究	(25)
3.1 兰利复合材料研究计划的主要驱动力	(25)
3.1.1 国家和全球事件对国家科技政策的影响	(25)
3.1.2 NASA 响应 OSTP 指导的优先权和计划	(25)
3.2 NASA 兰利复合材料研究资助的基础及重点研发项目	(27)
3.3 NASA 和 FAA 研究合作	(30)
3.4 复合材料研究生教育计划	(32)
3.5 NASA 项目的经验	(35)
参考文献	(38)
第 4 章 亚声速运输机研究	(39)
4.1 复合材料环境曝露计划	(39)
参考文献	(46)
4.2 飞机节能复合材料计划	(47)
参考文献	(58)
4.3 碳纤维风险分析计划	(59)
参考文献	(62)
4.4 纺织复合材料	(63)
参考文献	(65)

4.5	先进复合材料技术计划	(66)
4.5.1	ACT 飞机机翼	(71)
4.5.2	ACT 机身项目	(83)
4.5.3	ACT 成本建模	(86)
4.5.4	缝合复合材料的新进展	(87)
	参考文献	(90)
4.6	美国航空公司 587 航班事故的结构研究	(92)
4.6.1	引言	(93)
4.6.2	空客 A300-600 认证的调查	(93)
4.6.3	模型发展和确认	(94)
4.6.4	失效模式发展和确认	(95)
4.6.5	最有可能失效模式的确认	(102)
4.6.6	失效顺序分析	(106)
4.6.7	结论	(109)
	参考文献	(109)
4.7	经验教训和未来方向	(110)
第 5 章	复合材料在商业运输中的应用	(111)
5.1	经验教训	(111)
5.1.1	设计	(111)
5.1.2	制造	(112)
5.1.3	航空公司运营	(113)
5.2	主要的最新进展	(115)
5.3	新的挑战	(116)
5.4	未来的发展方向	(118)
	参考文献	(118)
第 6 章	超声速运输机的研究	(119)
6.1	历史背景	(119)
	参考文献	(122)
6.2	SCAR 计划	(122)
	参考文献	(128)
6.3	高速研究计划	(129)
6.3.1	简介	(130)
6.3.2	树脂/复合材料进展	(131)
6.3.3	规模化应用和测试	(131)
6.3.4	老化研究	(132)
6.3.5	结构	(137)
	参考文献	(142)

6.4	航空超声速基础研究项目	(143)
6.5	经验教训和未来方向	(146)
	参考文献	(146)
第7章	通用航空	(147)
7.1	比奇“星舟”飞船 (Beech Starship)	(147)
7.2	先进通用航空运输试验复合材料	(148)
	参考文献	(154)
7.3	经验教训和未来发展方向	(154)
第8章	旋翼机	(156)
8.1	抗坠毁性	(156)
	参考文献	(158)
8.2	吸能材料和概念	(158)
	参考文献	(162)
8.3	经验教训和未来发展方向	(163)
第9章	运载火箭	(164)
9.1	航天飞机货舱门	(165)
	参考文献	(166)
9.2	先进空间运输系统复合材料	(166)
	参考文献	(170)
9.3	复合材料低温贮箱	(170)
9.3.1	最先进的美国空军 DC-X 和 NASA 对 DC-XA 的贡献	(171)
9.3.2	未来可重复使用运载器复合材料应用的 NASA 技术开发结构测试	(171)
9.3.3	NASA X-33 运载火箭和复合材料贮箱	(173)
9.3.4	复合材料贮箱失败的原因: 微细裂纹和其他原因	(175)
	参考文献	(178)
9.4	“战神”1号和“战神”5号运载火箭	(179)
	参考文献	(183)
9.5	复合材料乘员舱	(183)
	参考文献	(186)
9.6	经验教训和未来发展方向	(186)
第10章	空间材料和结构	(187)
10.1	空间材料的发展	(187)
	参考文献	(188)
10.2	空间结构	(188)
	参考文献	(189)
10.3	空间环境效应	(189)
	参考文献	(190)

10.4 复合材料的尺寸稳定性	(191)
参考文献	(192)
10.5 长期曝露设施	(193)
参考文献	(196)
10.6 经验教训和未来的发展方向	(198)
第 11 章 NASA 兰利研究中心的耐高温聚合物技术研究进展	(199)
11.1 纤维和树脂的发展时间路线	(199)
11.2 新团队组建初期	(201)
11.3 高温聚合物研究背景	(203)
11.4 兰利对热稳定聚合物的追求：开端	(207)
11.5 复合材料基础研究：无论成功或失败都将继续	(210)
11.5.1 线性热塑性聚合物	(211)
11.5.2 低交联密度热塑性聚合物	(224)
11.5.3 高交联密度的热固性树脂	(227)
11.6 高速研究计划——树脂和复合材料的发展：实现	(230)
11.6.1 引言和指标性能	(230)
11.6.2 初始候选材料与筛选	(232)
11.6.3 早期 PETI 候选材料：LARC - PETI - 1 与 LARC - PETI - 2	(234)
11.6.4 候选材料：LARC - PETI - 4、LARC - 8515 和 LARC - PETI - 5	(236)
11.6.5 LARC - PETI - 5 的制造工艺	(246)
11.6.6 HSR 胶黏剂	(248)
11.6.7 HSR 数据库	(251)
11.7 胶黏剂及其他应用	(252)
11.8 聚合物表征：1962—1995	(254)
11.9 经验教训和未来方向	(260)
11.9.1 经验教训	(260)
11.9.2 未来研究方向	(261)
参考文献	(262)
第 12 章 复合材料制造技术	(280)
12.1 制造技术时间表与综述	(280)
12.2 高性能复合材料制造工艺的可变因素	(281)
12.3 环氧树脂的液体成形或树脂膜熔渗工艺	(281)
12.4 连续纤维预浸料制备技术	(282)
12.5 非热压罐成形铺放工艺技术：干法自动铺丝/带工艺	(283)
12.6 粉末浸渍法预浸带制备技术	(289)
12.7 粉末浸渍法增强纤维织物	(293)
12.8 预浸带制备技术	(294)