



大飞机出版工程
总主编 顾诵芬

复合材料连接

Joints for Composites Materials

谢鸣九 编著
黎观生 主校
章怡宁 主审



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

大飞机出版工程
总主编 顾诵芬

复合材料连接

Joints for Composites Materials

谢鸣九 编 著
黎观生 主 校
李武铨 副主校
章怡宁 主 审
汪 海 副主审



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

内 容 简 介

本书基于作者 30 多年来在飞机复合材料结构连接设计、分析和试验方面的研究经历及成果,特别是基于作者主持编写的《复合材料连接手册》和《复合材料结构设计手册》等专著中“连接”章节的有关内容编写而成。全书共分为 6 章,包括复合材料连接概述、胶接、机械连接、连接有限元分析、开孔和复合材料元件试验等,在内容编排上由浅入深,先阐述胶接和机械连接设计与分析的基础知识,再介绍复合材料层压板胶接和机械连接多种力学性能试验方法,反映出最新的连接设计研究与发展动态。

本书可作为高等院校固体力学、复合材料结构设计和航空航天结构与强度专业研究生教材或教学参考书使用,也可供从事航空航天飞行器复合材料结构设计、强度校核和试验的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料连接 / 谢鸣九编著. —上海:上海交通大学出版社,2011
(大飞机出版工程)
ISBN 978-7-313-08077-6

I. ①复… II. ①谢… III. ①飞机—复合材料结构 IV. ①V257

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 282029 号

复合材料连接

谢鸣九 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

常熟市华通印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 29.5 字数: 584 千字

2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-08077-6/V 定价: 125.00 元

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:0512-52391383

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副主任、两院院士)

副总主编：

金壮龙(中国商用飞机有限责任公司副董事长、总经理)

马德秀(上海交通大学党委书记、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、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教授)

许金泉(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院工程力学系主任、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(上海交通大学航空航天学院副院长、研究员)

沈元康(国家民航总局原副局长、研究员)

陈刚(上海交通大学副校长、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(上海交通大学副校长、教授)

金兴明(上海市经济与信息化委副主任、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(上海交通大学航空航天学院研究员)

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、重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,应用和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,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《飞机性能捷算法》,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。

祝涌芬

2009年12月15日

前 言

先进复合材料因其比强度高、比刚度高、抗疲劳性能优良和材料铺层可设计性等优异特性而成为改善产品性能的关键材料,并在航空航天飞行器结构中得到了广泛应用。目前,先进复合材料在飞机结构中的应用已经从次承力结构发展到机翼和机身等主承力结构,其用量也已经成为衡量飞机先进性的重要标志。

一般飞机结构设计必须将飞机结构安排适当和足够的设计分离面以满足飞机总体的功能、运输、维护、成本、重量和制造可行性等要求。同时还必须安排足够的工艺分离面,考虑制造方的能力(包括设备、技术、人员的限制)、并行制造、制造成本和周期要求等。

在飞行器结构设计中,为提高结构效率,整体化设计与制造是当前普遍采用的重要手段之一。特别是复合材料结构发展尤为迅速,与金属结构相比,由于 RTM 和 RFI 等整体成型制造工艺的出现和完善,热压罐固化技术的成熟与发展,先进复合材料在提高结构整体化设计与制造方面越发显现出其特有的优越性。随着航空制造水平的不断提升,工艺分离面大幅度减少。现在普通部位的机械连接,例如蒙皮与筋条的机械连接,已基本退出历史舞台,被共固化、共胶接和二次胶接所替代。

虽然随着分离面的减少,连接部位随之减少。但尚存分离面的连接传递的载荷更大,需要连接的板更厚和钉径更大,连接区的受力和形状更为复杂,应力集中的影响更为突出,使得这些分离面的连接愈加显得重要和关键。如机身段之间的连接,中外翼之间的连接,机翼与机身的连接、起落架与机体的连接、外挂连接加强区等部位。因此,在飞行器复合材料结构设计中,连接设计总是不可避免的,始终是结构设计的关键环节。设计工程师必须全面掌握连接的设计技术,尤其是细节设计,并且有必要的试验作为技术支撑。设计工程师面临的责任和风险更为重大,稍有不慎连

接区就有可能成为结构的最薄弱部位,对飞机安全构成威胁,可能还会酿成无法挽回的后果。

结构连接部位通常是整个结构的最薄弱环节,连接部位设计技术也是飞行器复合材料结构设计中的关键技术。由于复合材料结构的连接设计水平与飞行器的安全与结构效率密切相关,因此,20世纪末至21世纪初,美国、欧洲及我国先后启动的若干个研究计划都不乏针对复合材料结构连接设计、分析和试验的关键技术研究内容,各大航空研究单位、大学等研究团队也发表了大量研究论文,有关研究成果已应用到相关的飞行器研制中。

复合材料结构连接设计和强度分析与金属结构不同,其影响因素也远比金属结构复杂得多,有些方面甚至与金属结构有着本质的差别。因此,如果仍然沿袭金属结构的连接设计原则和方法,可能会产生极大误差,甚至可能导致严重后果。例如,复合材料结构连接部位的钉孔切断了纤维,导致孔边应力分布较复杂,加之复合材料本身属脆性材料,孔边的应力集中较严重,使得多排钉孔传力时的钉孔载荷分配更不均匀;连接强度与铺叠方式、载荷方向和环境影响等多种因素密切相关;连接的失效模式多而且预测强度较困难等等。这些特点都使得复合材料结构的连接强度问题变得更复杂,准确分析其静强度和疲劳强度变得更困难。同时,这些特点也表明复合材料结构的连接强度问题具有较强的可设计性。因此,开展该领域的深入研究具有非常重要的意义。

本书是关于复合材料结构连接的一部专著,内容涵盖了复合材料结构连接设计、分析和试验,内容取自作者30多年来的研究成果和国内外研究学者的代表性研究成果。如:本书部分内容取自作者主编的《复合材料连接手册》,该手册是集体智慧的产物,它凝结了中国航空工业部门众多研究单位科研人员的智慧结晶。其中,机械连接的内容主要来自成都飞机设计研究所、沈阳飞机设计研究所和中国飞机强度研究所有关连接设计和强度分析的研究课题,主要负责人为黎观生、章怡宁、李武铨、施丽中、王洪珠、汪海和谢鸣九等。借此机会向所有参与《复合材料连接手册》编写、校对、审核及所有做出贡献的同志表示衷心的感谢!

本书的编著基本原则是,一方面阐明连接的基本设计原理,使初学者掌握主要设计原则,避免犯低级错误。另一方面要反映最新的连接设计研究与发展动态,为读者深入研究创造条件。本书在编写时尽量遵循工程应用方便、技术先进可靠、分

析科学严谨和内容系统完整的原则,力求反映出国内外复合材料结构连接技术发展的最新水平。期望本书的出版能对从事这一领域工作的工程技术人员有所帮助,从而创造性地设计出重量更轻、可靠性更高的复合材料结构。

全书共分为6章:连接概述、胶接、机械连接、连接有限元计算、开孔和复合材料元件试验等。内容不仅包含胶接和机械连接设计与分析的基础知识,便于读者理解,而且也包含设计和分析的最新国内外研究成果,以便读者深入研究。胶接内容除了基本的连接形式外,还较全面地介绍了 π 连接、T连接和榫—槽连接等结构连接设计与分析方法。

机械连接的数据多数来源于国内主要航空科研单位的研究结果,其中包含应力减缓因子与铺层比例关系曲线和简单实用的当量挤压强度校核方法。该方法获得了国内外飞机设计部门的普遍认可,并成功地应用于多个飞机型号的复合材料结构连接设计。本书还首次发布了复合材料/金属混合结构连接的钉载分配曲线及其材料、铺层、几何参数的修正系数,供设计人员使用。

在连接分析方法方面,本书除介绍多年来行之有效的经典分析方法外,还介绍了P型有限元和三维分析。在开孔区设计方面,本书介绍了含圆孔层压板的应力集中和强度计算方法。在复合材料元件试验方面,本书介绍和比较了层压板、机械连接和胶接等多种力学性能的试验方法。

2009年至2011年,作者受邀在上海交通大学航空航天学院为研究生讲课时曾使用了本书的部分内容。三年的教学生涯获益匪浅,这得益于上海交通大学航空航天学院汪海副院长及其领导的团队提供的和谐融洽、进取开拓的氛围、工作上的大力帮助和生活上的悉心关照,衷心地感谢他们!另外,黎观生和汪海同志对于本书的结构提出了许多建设性的建议,沈真同志校对了对第六章,特此致谢。感谢助课老师陈秀华和学生们的协助,感谢上海交通大学出版社的编辑们为出版此书付出的辛勤劳动,感谢多年来在思想、工作和生活不断给予我鼓励、支持和帮助的所有朋友和亲人们!正因为有上述各方创造的良好条件和伸出的援手,我才得以在古稀之年完成此书的编写,感到非常欣幸!

本书可作为高等院校固体力学、复合材料结构设计和航空航天结构与强度专业研究生教材或教学参考书使用,也可供从事航空航天飞行器复合材料结构设计、强度校核和试验的技术员参考。

本书内容繁多,本人才疏学浅,虽经努力,但难免挂一漏万,如发现错误烦请告知,不胜感谢。通信地址:西安市 86 号信箱退休办,邮编 710065,或发至邮箱 mingjiu999@hotmail.com。

谢鸣九

2011 年 9 月于西安

目 录

1 复合材料连接概论

1.1 复合材料连接设计的必要性和重要性

1.2 复合材料与金属的性能比较

1.2.1 复合材料与金属的共同点

1.2.2 复合材料与金属的不同点

1.3 复合材料连接方法及其选择

1.3.1 复合材料连接方法

1.3.2 胶接连接特点

1.3.3 机械连接特点

1.3.4 缝合连接的特点

1.3.5 Z-Pin 连接特点

1.3.6 混合连接特点

1.3.7 复合材料连接方法选取原则

1.3.8 连接设计一般要求及特别注意事项

1.4 复合材料连接破坏定义和连接效率

1.4.1 复合材料连接破坏定义

1.4.2 连接效率

参考文献

2 胶接

2.1 胶接连接概述

2.2 胶粘剂

2.2.1 胶粘剂应具有的性能

2.2.2 常用的胶粘剂类型

2.2.3 胶接试件制备

2.2.4 适宜于粘接不同材料的胶粘剂

- 2.2.5 环境对胶粘剂性能的影响
- 2.2.6 胶层的力学特性
- 2.3 胶接连接设计基础
 - 2.3.1 胶接连接的特点
 - 2.3.2 胶接连接的分类
 - 2.3.3 胶接连接的载荷类型
 - 2.3.4 胶接破坏模式
 - 2.3.5 胶接基本连接形式及其选择
 - 2.3.6 搭接长度和弹性槽
 - 2.3.7 胶接面纤维取向
- 2.4 影响复合材料胶接强度的主要因素
 - 2.4.1 理论基础
 - 2.4.2 连接形式
 - 2.4.3 被胶接件的弹性模量和厚度
 - 2.4.4 被胶接件刚度不等
 - 2.4.5 胶粘剂韧性
 - 2.4.6 胶层厚度
 - 2.4.7 被胶接件热失配
 - 2.4.8 温度和湿度
 - 2.4.9 胶接缺陷
- 2.5 典型胶接连接构型的应力特性
 - 2.5.1 概述
 - 2.5.2 胶层剪应力
 - 2.5.3 胶层剥离应力
 - 2.5.4 热应力影响
- 2.6 胶接连接基本构型的静强度设计
 - 2.6.1 单搭接连接
 - 2.6.2 双搭接连接
 - 2.6.3 阶梯形搭接连接
 - 2.6.4 斜面搭接连接
- 2.7 胶接结构耐久性设计
 - 2.7.1 胶粘剂
 - 2.7.2 被胶接件的表面制备
 - 2.7.3 工装设计与加工
 - 2.7.4 密封
 - 2.7.5 避免产生电化学腐蚀

- 2.7.6 注意胶接结构中的热应力
- 2.7.7 结构细节设计
- 2.7.8 质量控制
- 2.7.9 复合材料胶接结构的耐久性试验
- 2.8 π 型连接
 - 2.8.1 π 型连接概述
 - 2.8.2 π 型连接的构成及其特点
 - 2.8.3 π 型连接的载荷类型和破坏模式
 - 2.8.4 π 连接参数影响的试验和分析
 - 2.8.5 基于可靠性分析的 π 连接参数影响
- 2.9 T型连接
 - 2.9.1 T型连接特点
 - 2.9.2 基于试验的T-连接构型对强度的影响
 - 2.9.3 基于分析的凸缘末梢端形状对T-连接刚度和强度的影响
 - 2.9.4 基于分析的不同T连接构型的比较
 - 2.9.5 夹层结构胶接和螺接T-连接强度对比
 - 2.9.6 夹层结构T-连接参数研究
 - 2.9.7 夹层结构单体式连接
 - 2.9.8 夹层结构T连接凸缘的概念设计
- 2.10 榫-槽连接
 - 2.10.1 榫-槽(T-G)连接几何构型和特点
 - 2.10.2 试件材料
 - 2.10.3 影响榫-槽连接强度的主要参数
- 2.11 胶接连接设计原则
 - 2.11.1 基本原则
 - 2.11.2 构型选择原则
 - 2.11.3 阶梯形连接设计原则
 - 2.11.4 斜面连接设计原则
 - 2.11.5 降低剥离应力的措施
 - 2.11.6 胶粘剂选择原则
 - 2.11.7 表面处理
 - 2.11.8 湿热环境影响
 - 2.11.9 检测
 - 2.11.10 搭接端部胶粘剂形状

参考文献

3 机械连接

3.1 机械连接概述

3.2 机械连接设计基础

3.2.1 机械连接载荷和破坏模式

3.2.2 机械连接几何参数的定义及选择

3.2.3 机械连接形式及其选择

3.2.4 紧固件的选用及对拧紧力矩的要求

3.2.5 连接区的铺层设计

3.2.6 影响复合材料机械连接强度的主要因素

3.3 主承力连接区设计

3.3.1 主承力连接区的确定

3.3.2 辅助元件试验

3.3.3 组合件试验

3.3.4 验证性试验

3.3.5 分析方法

3.3.6 连接区设计一般原则

3.4 机械连接静力分析

3.4.1 机械连接静力分析步骤

3.4.2 机械连接钉载分配分析

3.4.3 机械连接的理论分析方法

3.4.4 机械连接的经验方法

3.4.5 多钉规则排列连接工程计算方法

3.5 螺栓连接强度

3.5.1 全碳纤维复合材料单钉连接强度

3.5.2 全碳纤维复合材料多排钉连接强度

3.5.3 混杂复合材料螺栓连接强度

3.5.4 缝合/RFI 碳纤维复合材料连接强度

3.5.5 单钉连接强度校核方法

3.5.6 多排钉连接强度校核

3.5.7 连接设计和强度校核举例

3.6 钉载分配有限元分析结果

3.6.1 工况说明

3.6.2 钉载分配

3.6.3 钉载分配修正系数

3.6.4 钉排数对钉载分配的影响

- 3.7 铆接
 - 3.7.1 铆接设计一般原则
 - 3.7.2 铆接强度
- 3.8 胶铆(螺)混合连接
 - 3.8.1 概述
 - 3.8.2 胶铆(螺)混合连接强度
 - 3.8.3 新型混合连接构型
- 3.9 机械连接疲劳
 - 3.9.1 疲劳失效准则
 - 3.9.2 机械连接疲劳的特点和工程设计建议
 - 3.9.3 机械连接疲劳试验方法
 - 3.9.4 机械连接疲劳性能及影响参数
 - 3.9.5 机械连接剩余强度
- 3.10 紧固件
 - 3.10.1 概述
 - 3.10.2 紧固件选用
 - 3.10.3 铆钉
 - 3.10.4 盲紧固件
 - 3.10.5 环槽铆钉
 - 3.10.6 复合材料常用螺栓

参考文献

4 复合材料连接有限元分析

- 4.1 概述
- 4.2 胶接连接有限元分析
 - 4.2.1 概述
 - 4.2.2 普通元素
 - 4.2.3 NASA 弹簧元
- 4.3 机械连接有限元分析
 - 4.3.1 概述
 - 4.3.2 二维有限元模拟
 - 4.3.3 间隙元 GAP
 - 4.3.4 BUSH 元
 - 4.3.5 BOLJAT 全三维方法
 - 4.3.6 刚体元与梁元组合(GBJM 模型)
 - 4.3.7 CAI 和 StressCheck 方法

- 4.4 P型元方法和 StressCheck 软件
 - 4.4.1 P型元方法
 - 4.4.2 StressCheck 软件介绍
 - 4.4.3 电子版手册示例
- 4.5 模拟复合材料分层扩展起始的界面元素
 - 4.5.1 VCCT 技术
 - 4.5.2 Cohesive 技术
 - 4.5.3 Z-pin 增强复合材料的模拟
- 4.6 失效准则
 - 4.6.1 复合材料层压板失效准则
 - 4.6.2 胶接连接失效准则
 - 4.6.3 机械连接失效准则
 - 4.6.4 刚度性质退化规则

参考文献

5 开孔

- 5.1 开孔应力集中
 - 5.1.1 无限大正交各向异性板圆孔的应力集中
 - 5.1.2 应力集中的板宽修正系数
- 5.2 开孔板强度预示
 - 5.2.1 点应力准则
 - 5.2.2 平均应力准则
 - 5.2.3 特征尺寸 d_0 和 a_0
 - 5.2.4 破坏准则应用实例

参考文献

6 复合材料元件试验

- 6.1 概述
- 6.2 层压板力学性能试验
 - 6.2.1 概述
 - 6.2.2 拉伸性能试验
 - 6.2.3 压缩性能试验
 - 6.2.4 剪切性能试验
 - 6.2.5 弯曲性能试验
- 6.3 开孔和填充孔性能试验
 - 6.3.1 开孔拉伸性能试验