



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

# 复合材料连接技术

Joints for Composites Materials

谢鸣九 编著



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

# 复合材料连接技术

---

Joints for Composites Materials

谢鸣九 编著



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

## 内容提要

本书是作者根据多年来从事飞机复合材料结构连接研究的经验及参考国内外经典的和近来的研究成果编写而成。本书的胶接、机械连接、夹层结构连接和开孔等章的内容主要基于作者主编的《复合材料连接手册》和《复合材料连接》的有关内容,但是补充了国内外新近的研究结果。本书的共固化缝合连接和共固化 z-pin 连接、混合连接和混合胶接、特殊连接和创新连接等章则是全新的内容,较全面反映了国内外航空航天和交通运输等行业最近研发的成果及新出现的连接方法。

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、交通运输车辆和风电叶片等复合材料结构设计和分析的技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

复合材料连接技术/谢鸣九编著. —上海:上海交通大学出版社,2016

大飞机出版工程

ISBN 978-7-313-16399-8

I. ①复… II. ①谢… III. ①航空材料-复合材料-连接技术

IV. ①V25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 312084 号

## 复合材料连接技术

编 著: 谢鸣九

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: 896 千字

版 次: 2016 年 12 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-16399-8/V

定 价: 268.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 45

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

顾诵芬（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,注重民机结构与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、中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司、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

# 前 言

以碳纤维为代表的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,其用量业已成为衡量飞机先进性的重要标志之一。

由于先进复合材料价格昂贵,很长一段时间内大量的应用多限于航空航天结构,但随着复合材料制造工艺的改进和价格的降低,现在已经扩展到车辆、船舶和风电等众多民用大型机械产品。

无论任何结构设计,包括飞行器、舰船、车辆和风力发电机等都希望尽量采用整体化设计与制造以便减少连接和提高结构效率,这是当今材料、工艺和设计发展的趋势,但任何结构想要完全避免连接是不太可能的,一般都必须安排一定的分离面。只不过飞行器结构对重量要求更为敏感得多,因此对提高结构效率的任何措施都备受重视。

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。

复合材料整体化结构设计与制造带来的效益是显著的,世界第一个大型客机波音 787 全复合材料机身最能说明这一点。波音 787 飞机机身总长 55.5m,分为前机身 2 段,中机身 3 段,后机身 2 段,每个机身筒体都是一个整体件。整个机身只有筒体间端部与端部的连接,消除了通常金属结构长桁、框、蒙皮之间的大量机械连接,减少大约 5 万个紧固件。实现上述目标需要两个前提:第一,前期进行大量的预先技术研究,使之建立在可靠的技术基础之上;第二,制造设备和技术的成熟,关键设备是巨大体量的热压罐(直径 9m,长度 20m 以上)。上述两点并不是一朝一夕或者仅靠一个单位就可以实现的。当然同时也要看到一体化带来的风险,并非适合一切情况。可以预计在今后相当长的时期内复合材料整体化结构设计与制造都是消除结构应力集中和减轻结构重量的最重要手段。

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,连接设计不仅是不可避免的,而且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,对飞行安全构成威胁,可能还会酿成无法挽回和非常严重的后果。

结构连接部位通常是整个结构的最薄弱环节,连接部位设计技术更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、欧洲及我国都先后启动各自的复合材料结构连接研究计划,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有许多以及很大的差别,其影响因素也远比金属结构复杂得多。因此,如果仍然沿袭金属结构连接设计的原则和方法,很可能造成严重后果。例如,由于复合材料的各向异性和脆性,钉孔切断了纤维,导致孔边应力分布复杂和应力集中严重,多排钉连接的载荷分配直至连接破坏都是不均匀的;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。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。

岁月在流逝,时代在前进,科技在发展。出于环境保护、节约资源和 CO<sub>2</sub> 减排保护人类赖以生存的地球和可持续发展的国际大环境的要求,促使结构设计必须有所发展和突破,目前来看主要反映在两方面:轻重量设计理念和采用热塑性复合材料。

以往大多单一材料组成的结构很难实现上述要求。轻重结构设计理念之一就是采用不同材料组成的混合结构,可以充分利用各个材料的优点,相互弥补各自的不足,尤其是聚合物-金属混合结构备受重视。采用聚合物-金属混合结构必须有新的连接技术与之适应,否则,如果仍然采用原有的机械连接和胶接等技术,由于其各自固有的不足,如工序复杂、价格昂贵、效率较低或者环境不友好等,远不能适应现代大批量生产对于产品的经济性要求,这一点在汽车行业表现尤为突出,于是就需要研发新的连接技术。

众所周知,聚合物基复合材料一般分为两大类:热固性和热塑性。目前广泛应用的热固性复合材料的固化反应是不可逆的,即不能够重熔和重溶,因此造成两个严重后果:第一,不易降解,很难回收再利用,其废弃物一般采用填埋或者燃烧等方法处理,对环境造成严重污染,这不符合当今环保节约资源的大趋势。第二,很难焊接,只能胶接或机械连接,但这两种连接方法又都有各自严重的缺点,前者清洁工序复杂,质量难以保证一致;后者由于钻孔的原因,连接效率低下。

与热固性复合材料相比较,热塑性复合材料具有如下一些特点:可回收再利用,不仅减少了废料对环境的污染,而且还产生了巨大的市场效益。不需要固化周期,生产加工周期短,构件可以通过加热局部界面或焊接来实现连接。热塑性树脂在固化中没有化学反应发生。因此,不会释放有害物质,预浸料可长期保存。在断裂韧性、冲击后力学性能、耐破损性、耐热性方面,热塑性复合材料比热固性复合材料性能要好得多。热塑性材料很难胶接,一般采用焊接和热压成形。大多数热塑性树脂加工困难,成本较高,热塑性复合材料的疲劳性能相当差。鉴于上述优点,当今热塑性复合材料的发展和应用范围在迅速扩大。伴随着热塑性复合材料的应用也必须研发与之适应的新的连接技术。

2009—2012年,作者受邀在上海交通大学航空航天学院为大飞机研究生班的

学生讲授“复合材料连接”一课。四年的教学生涯不仅令我感到自豪和欣慰,更是使我获益匪浅,向教研组的陈秀华、刘龙泉等老师及学生学习到不少以前我了解不多的知识。这期间我的业务知识范围和水平都得到了很大的提高和扩展。这得益于汪海研究员领导的团队提供的和谐融洽、开拓进取的氛围,以及工作上的大力帮助和生活上的悉心关照,衷心地感谢他们。

2011年年底根据当时的讲稿内容出版了《复合材料连接》一书。从2012年开始又应学会之约,根据该书的主要内容连续4年举办了总共8期的“复合材料连接”学习班,这种互动式的学习班使教学双方都得到了较大提高。

本书是关于复合材料结构连接的一部专著,内容几乎涵盖了复合材料结构连接现有的各种连接技术和国内外最新的研究成果。本书“胶接”和“机械连接”的大部分内容取自作者主编的《复合材料连接手册》和《复合材料连接》。前者是20世纪90年代初一部颇有影响力的手册,该手册凝结了中国航空工业部当年有关连接研究的主要科研成果,是集体智慧的结晶。当年主要从事飞机复合材料结构设计的中国航空工业成都、沈阳和西安飞机设计研究所的主管总师、设计室主任和强度室主任,以及众多具有丰富实践经验和理论基础的专家和教授参与手册的编写、校对和审核,确保了手册的编写质量和权威性,因此至今仍然在发挥重要作用。借此机会向所有参与上述工作的人员表示衷心的感谢。

《复合材料连接》一书由上海交通大学出版社出版后比较受欢迎,2015年初就已经售罄。此时,社部项目部主任兼先进制造技术出版中心常务副主任钱方针博士告知我希望该书修正错误后再版发行。我考虑到原书有一些局限性,还是出版一本新书为好。第一,随着时间的推移科学技术在不断发展,连接技术也不例外,再版发行不能反映最新的研究成果;第二,原书内容仅限于胶接和机械连接,虽然它们目前仍然是主要采用的连接手段,但范围还是比较狭窄。好在《复合材料连接》一书出版后我没有停下脚步,为新书出版一直在做准备,补充了有关连接的方法,积累了一些国内外最新的有关复合材料连接的研究素材,弥补原书稿的内容缺陷。

本书编著的基本原则是既要阐明复合材料连接设计的基本原理和方法,使初学者掌握主要设计原则,避免犯低级错误;又要反映国内外最新的连接研究现状,使读者了解当今的发展动态。本书选材尤其偏重选取有试验内容做支撑的研究论文,以便为读者深入研究创造条件。期望本书的出版能对从事这一领域工作的研究者和

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。

本书共 8 章,全部是有关复合材料连接技术的。本书与《复合材料连接》一书比较,第 1~3 章和第 8 章是对原书相应内容进行了补充和改进。第 4~7 章是全新增加的内容。鉴于没有大的改动,本书没有包含“复合材料连接有限元分析”和“复合材料元件试验”两章,感兴趣的读者请参看《复合材料连接》一书。

第 1 章“复合材料连接概论”讲述连接的必要性重要性及各种连接方法的优势和不足。第 2 章“胶接”讲述胶接连接的设计与分析,基本上根据原书的提纲进行编写,补充了一些内容。第 3 章“机械连接”讲述机械连接的设计与分析,也基本上依据原书的提纲进行编写,补充了铆接内容。第 4 章“共固化缝合连接和共固化 z-pin 连接”阐述它们的基本技术原理及其连接强度。第 5 章“混合连接和混合胶接”介绍众多混合连接的强度和混合胶接的概念。第 6 章“夹层结构连接”介绍夹层结构连接的类型和镶嵌件。第 7 章“特殊连接和创新连接”反映了当今世界最新和最具影响力的连接新技术。第 8 章“开孔”给出了各向同性和各向异性材料含圆孔和椭圆孔的应力集中及应力分布。

自从 1978 年我从事复合材料连接强度研究至退休的二十几年间,除承担部管预研连接课题外,还承接了成都和沈阳飞机设计研究所许多型号的连接试验研究任务,这些任务让我了解到众多连接形式的特点。可以说没有以上大量的试验作为基础,我对复合材料连接的理解决不会有今天这样深刻。借此机会向所有合作者对我的信任和支持表示衷心的感谢。同时感谢与我一起共事多年的中国飞机强度研究所的同仁们,他们为试件加工、试验和检测等付出了巨大繁杂的劳动。感激那些帮我克服困难、渡过难关和摆脱困境的朋友们!感谢多年来在思想、工作和生活不断给予我信心、鼓励、支持和帮助的所有朋友们!

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!

感谢黎观生、汪海和李武铨研究员,多年来我向他们请教了不少有关复合材料结构设计和强度方面的知识,他们更对本书的结构安排和内容取舍提出了许多很有价值的建议。

脱稿之际,深切怀念不久前辞世的妻子马映秋,乐观豁达、谦让包容、宽厚待人和自强不息的她,陪伴我半个世纪相濡以沫的共同工作,在生活中给予我极大的支

持和无微不至的关爱,可以说没有她对全家一贯的悉心照顾,解除我的后顾之忧,我也不会取得今天的些许成绩。

生活还在继续,希望有生之年在新老朋友的大力支持下,我还愿尽微薄之力与各位有志于复合材料连接研究的同行们一起,继续从事一点复合材料连接研究。

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、交通运输和风电复合材料结构设计、强度校核和试验的技术人员参考。

本书涉及内容繁多,参考了大量的国内外文献,在引用参考文献方面可能会有所遗漏,有的引用了二手资料却可能漏掉原文作者,敬请有关作者谅解,并请来函告知,今后如有机会当予以弥补。本书包含许多国外最新的连接技术,没有找到可供借鉴的术语译法,仅根据本人的理解予以书写,只想起一个抛砖引玉的作用,不当之处恳切希望有志之士来函探讨并进行深入研究。本书涉及的专业极广,涵盖材料、工艺、设计和强度分析等众多专业,包括航空航天、交通运输、风电等多种结构形式,由于受本人精力、学识及条件的限制,虽竭力避免错误,但仍可能存在疏漏,若发现错误和不当之处敬请来函告知,作者将不胜感谢。通信地址:西安市 86 号信箱退休办,谢鸣九,邮编 710065,或发至邮箱 [mingjiu999@163.com](mailto:mingjiu999@163.com)。

谢鸣九

2015 年 12 月 15 日

于西安家中



# 目 录

- 1 复合材料连接概论 1
  - 1.1 复合材料连接设计的必要性和重要性 1
  - 1.2 复合材料与金属的性能比较 2
    - 1.2.1 复合材料与金属的共同点 2
    - 1.2.2 复合材料与金属的不同点 2
  - 1.3 复合材料连接方法及其选择 4
    - 1.3.1 复合材料连接方法 4
    - 1.3.2 各种连接方法的特点 4
    - 1.3.3 连接方法选取原则及注意事项 7
  - 1.4 复合材料连接破坏定义和连接效率 8
    - 1.4.1 复合材料连接破坏定义 8
    - 1.4.2 连接效率 9
  - 参考文献 11
  
- 2 胶接 12
  - 2.1 胶接连接概述 12
  - 2.2 胶粘剂和胶接试件制备 12
    - 2.2.1 胶粘剂 12
    - 2.2.2 胶接试件的制备 22
  - 2.3 胶接连接设计基础 29
    - 2.3.1 胶接连接的特点 29
    - 2.3.2 胶接连接的类型及其强度比较 29
    - 2.3.3 胶接连接的载荷和破坏模式 35
    - 2.3.4 胶接基本连接形式及其选择 38
    - 2.3.5 影响复合材料胶接强度的主要因素 51
  - 2.4 典型胶接连接构型的应力特性 59
    - 2.4.1 概述 59