

“十二五”国家重点出版规划
精品项目

先进航空材料与技术丛书

先进树脂基复合材料 高性能化理论与实践

Theory and Application of High-performance
Polymer Matrix Composites

益小苏 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划
精品项目

先进航空材料与技术丛书

先进树脂基复合材料 高性能化理论与实践

益小苏 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书介绍了先进树脂基复合材料领域热塑性—热固性高分子体系的相变与流变,复相体系的温度—时间转换,复相体系的结构与性能,界面过程与“离位”复合增韧,“离位”增韧复合材料的基本性能与损伤机理,RTM 液态成型树脂体系,“离位”液态成型复合材料增韧高性能化,定型剂材料体系、连续化表面附载技术以及表面附载织物材料的结构与性能特征等,并适当地回顾了发展和展望了未来。

本书的基础素材来源于国家重大基础研究计划(国家 973 计划)等支持的科研项目,因此偏重基础理论研究及其应用基础研究,适合于从事复合材料技术研究、开发、设计、应用的科研人员和工程技术人员,也适用于大专院校的大学生、研究生和教师们阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进树脂基复合材料高性能化理论与实践 / 益小苏
著. —北京:国防工业出版社, 2011. 5
(先进航空材料与技术丛书)
ISBN 978 - 7 - 118 - 07398 - 0

I. ①先... II. ①益... III. ①树脂基复合材料
IV. ①TB332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 071272 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 29 $\frac{3}{4}$ 字数 564 千字
2011 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

《先进航空材料与技术丛书》

编 委 会

主 任 戴圣龙

副主任 王亚军 益小苏

顾 问 颜鸣皋 曹春晓 赵振业

委 员 (按姓氏笔划为序)

丁鹤雁 王志刚 王惠良 王景鹤

刘 嘉 刘大博 阮中慈 苏 彬

李 莉 李宏运 连建民 吴学仁

张庆玲 张国庆 陆 峰 陈大明

陈祥宝 周利珊 赵希宏 贾泮江

郭 灵 唐 斌 唐定中 陶春虎

黄 旭 黄 敏 韩雅芳 蹇西昌

廖子龙 熊华平 颜 悦

序

一部人类文明史从某种意义上说就是一部使用和发展材料的历史。材料技术与信息技术、生物技术、能源技术一起被公认为是当今社会及今后相当长时间内总揽人类发展全局的技术,也是一个国家科技发展和经济建设最重要的物质基础。

航空工业领域从来就是先进材料技术展现风采、争奇斗艳的大舞台,自美国莱特兄弟的第一架飞机问世后的 100 多年以来,材料与飞机一直在相互推动不断发展,各种新材料的出现和热加工工艺、测试技术的进步,促进了新型飞机设计方案的实现,同时飞机的每一代结构重量系数的降低和寿命的延长,发动机推重比量级的每一次提高,无不强烈地依赖于材料科学技术的进步。“一代材料,一代飞机”就是对材料技术在航空工业发展中所起的先导性和基础性作用的真实写照。

回顾中国航空工业建立 60 周年的历程,我国航空材料经历了从无到有、从小到大的发展过程,也经历了从跟踪仿制、改进改型到自主创新研制的不同发展阶段。新世纪以来,航空材料科技工作者围绕国防,特别是航空先进装备的需求,通过国家各类基金和项目,开展了大量的先进航空材料应用基础和工程化研究,取得了许多关键性技术的突破和可喜的研究成果,《先进航空材料与技术丛书》就是这些创新性成果的系统展示和总结。

本套丛书的编写是由北京航空材料研究院组织完成的。19 个分册从先进航空材料设计与制造、加工成形工艺技术以及材料检测与评价技术三方面入手,使各分册相辅相成,从不同侧面丰富了这套丛书的整体,是一套较为全面系统的大型系列工程技术专著。丛书凝聚了北京航空材料研究院几代专家和科技人员的辛勤劳动和智慧,也是我国航空材料科技进步的结晶。

当前,我国航空工业正处于历史上难得的发展机遇期。应该看到,和国际航空材料先进水平相比,我们尚存在一定的差距。为此,国家提出“探索一代,预研一代,研制一代,生产一代”的划代发展思想,航空材料科学技术作为这四个“一代”发展的技术引领者和技术推动者,应该更加强化创新,超前部署,厚积薄发。衷心希望此套丛书的出版能成为我国航空材料技术进步的助推器。可以相信,随着国民经济的进一步发展,我国航空材料科学技术一定会迎来一个蓬勃发展的春天。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '李锐' (Li Rui), written in a cursive style.

2011 年 3 月

前 言

复合材料指由两种或两种以上具有不同物理、化学性质的材料,以微观、介观或宏观等不同的结构尺度与层次,经过复杂的空间组合而形成的一个材料系统。先进复合材料指的是在性能和功能上远远超出其单质组分性能与功能的一大类新材料,它们通常都是在不同尺度、不同层次上结构设计、优化的结果。

先进复合材料以碳纤维增强的树脂基复合材料为数量上的主体,在发展历程上,它发祥于 20 世纪 70 年代,直接迎合了航空、航天和国防等尖端技术领域的需求,到今天为止,先进复合材料仍然对武器装备的现代化起着十分关键的支撑作用。以航空领域为例,目前,美国最先进的第四代战斗机上树脂基复合材料用量达 24%~36%、直升机达 46%,而欧洲战斗机的复合材料用量更高达 40%。在民用飞机领域,目前已投入商业运营、最先进的机型 A380 的复合材料用量已达到 28%,而即将进入市场的 B787 飞机将使用 50% 的复合材料。今天,先进复合材料继续保持自己在这些战略领域最富研究和发展潜力的结构材料的地位,并带动整个工业、特别是航空航天工业技术的进步。

近 10 年来,先进树脂基复合材料的“高性能化”技术已经成为国际范围研究发展的重点。典型的高性能化技术包括进一步提高增强纤维材料性能的新技术,提高层状化复合材料损伤容限的新技术,提高复合材料耐温耐蚀级别的新技术等,同时要求这种高性能化技术应兼顾材料制备与构件制造的低成本问题等,相应的技术手段包括纺织复合材料及其预制体技术、液态成型技术、大型复合材料制件的自动铺放/铺丝成型技术、非热压罐固化成型技术以及复合材料结构的新型无损检测新技术和结构健康检测技术等,发展的目标是低成本地制造大型、复杂、整体结构的复合材料制件,最终实现飞行器的高减重目标。而随着人们对复合材料科学和技术在认识和实践两方面的深入,智能复合材料、纳米复合材料、生物质(Bio-based)的所谓“绿色”复合材料等一大批新材料、新技术正在蓬勃兴起,同时,先进复合材料技术也正在与现代计算技术、现代制造技术、表征测试技术和应用技术等相结合,开创着 21 世纪先进复合材料技术发展的新纪元。

正是由于先进复合材料技术在国家和国防领域中的特殊的重要性,国家多个科技发展计划如国家重大基础研究计划(国家 973 计划)、国家高技术研究与发展

计划(国家 863 计划)、国家自然科学基金计划以及国家科技部国际合作计划等均选择了先进复合材料技术作为研究发展工作的重点之一。在这样的形势下,近年来,我们先后承担了国家 973 计划研究课题《多层次细观结构与特征目标性能的关联、数理模拟和结构优化设计》^①(课题编号:2003CB615604,课题负责人益小苏,2003 年—2008 年),国家 863 计划研究课题《先进复合材料多层次结构设计的数理工具与实验验证》(课题编号:2002AADF3302,负责人益小苏,2002 年—2004 年)和《大飞机结构用高性能 RTM 复合材料体系》(课题编号:2007AA03Z541,负责人益小苏,2007 年—2010 年),国家科技部国际合作计划重大专项研究项目《下一代高性能航空复合材料及其应用技术研究》(课题编号:2008DFA50370,负责人益小苏,2008 年—2009 年)以及国家自然科学基金重大基金项目课题《基于流体模拟的复杂系统工艺改进和质量控制与实验研究》^②(课题编号:10590356,课题负责人益小苏,2004 年—2009 年)等,在这些项目的支持下,我们重点关注如何在保证连续碳纤维增强复合材料层压板的比刚度和比强度的同时提高其韧性、特别是冲击后压缩强度,以实现这种复合材料的高性能化和整体化复合材料结构制件的低成本制造,满足航空航天复合材料技术发展的迫切需求。

本书主要以我们承担的国家 973 课题《多层次细观结构与特征目标性能的关联、数理模拟和结构优化设计》的研究工作为主线,适当结合了国际研究发展的历史、最新动态以及我们承担的其他研究项目等,演绎和介绍了具有我们研究特色的“离位(*Ex-situ*)”复合增韧新概念及其表面附载新技术、新材料、新装备和新方法等研究成果。研究工作涉及的材料种类覆盖环氧树脂、苯并噁嗪树脂、双马来酰亚胺树脂和聚酰亚胺树脂及其树脂基复合材料等,涉及的复合材料成型工艺包括热压罐工艺和液态成型工艺(如树脂转移模塑和树脂膜浸渗成型工艺)等两大类,这些材料种类和成型工艺技术几乎可以覆盖目前国内外绝大多数的航空复合材料技术,从这些范例里将不难看出,深入的基础研究将为复合材料的技术开发和工程化应用提供一个宽广的理论和工程平台,也正是因为这些内在的、基础性的共性联系,使得先进复合材料技术的研究与发展充满了创新的机遇和挑战,也充满了材料科学与技术的神秘和魅力!

整个研究工作主要是在北京航空材料研究院先进复合材料国防科技重点实验室完成的,并通过这个 973 课题延伸到一些大学和中国科学院的研究所等。研究

^① 973 项目《先进聚合物基复合材料的多层次结构和性能研究》(课题编号:2003CB615600),首席科学家韩志超教授。

^② 国家自然科学基金重大项目《高聚物成型加工与模具设计中的关键力学和工程问题》,项目负责人申长雨教授。

过程中,我们首先提出了一个创新性的概念及其目标技术体系,重点实验室的青年参研人员和工程师们主动依据他们的技术实践经验来学习和理解现代复合材料科学和工程学的成就,并在各类型号任务和研究项目中将这些新概念付诸实践,然后反馈改进我们初生的理论概念与材料技术,而大学和科学院研究所的老师和同事们则根据这些实践成果,帮助我们完善基础理论知识,因此,这是一个精彩的、学习型研究组合。值得特别指出,航空工业是我国最重要的战略性工业产业之一,北京航空材料研究院是我国航空工业系统内最强的材料研究单位,也是国家最富有材料研究实力的工业研究单位,我们的 973 团队正是依托了航空工业以及北京航空材料研究院这样的背景条件和研究平台,才使得我们能够成功地将理论与实践密切结合,并得以在较短的时间内迅速走完从概念性研究直至演示验证和工程应用的长流程,打通技术价值链,同时带起了一支了解基础理论、善于工程应用的研究开发队伍。

2007 年,周光召先生在亲临科研现场听取了我们的汇报后说:“我认为你们的 973 课题完成得非常好,非常出色!你们采用了全新的学术思想,使复合材料的(冲击后压缩)强度提高了一倍以上,说明你们取得的技术进步的确依靠了创新的力量。”“你们内部组织了很好的研究团队,还包括了中科院的研究所与高校,而且外部与企业建立了战略合作联盟,为科研成果准备了出口,这说明在工业部门的领导下,973 也是能够出大成果的。”他进一步总结说:“基础研究不能局限在实验室,实验室里只能出样品,不能创造价值,因为不是工业产品,而且工艺、技术也不成熟。基础研究的目的是搞清楚为什么,但为了使研究成果满足国家目标,有意义,有结果,就必须往工业延伸,必须在生产上有量,要到生产上去证实,否则 know how 就出不来,也积累不起来。有许多应用就是基础研究搞得好,从应用中又发现了新的基础问题。你们的工作恰恰证明,应用工作做得好,科技成果转化得快,正是因为基础研究做得好,做得透。因此,应该加强与应用部门和企业的合作,通过与合作,把基础研究的潜力充分发掘出来,这样才能提升中国国家的创新高度”。“通过这个项目,基础研究的作用已经得到很好的体现,也得到国际跨国企业的认可,在国际合作方面也有很好的进展。”周光召先生最后勉励我们说:“航空工业是我们国家的战略性产业,是国家目标,是中国人最关心的事情,也是一块心病,如果不能独立自主地解决,就不能成为航空大国。因此,航空材料应该立足国内自主保障,我国的航空材料具有很大的发展前景。”我们特别感激和荣幸的是,2010 年,在中国科学技术学会的第 12 届年会上,我们的这个研究工作荣获周光召基金会“应用科学奖”的个人奖和团队奖!在此,我深深感谢周光召先生和周光召基金会对我们工作的鼓励和鞭策。

本书的内容主要取材于2008年验收的国家重大基础研究发展计划(973计划)项目课题《多层次细观结构与特征目标性能的关联、数理模拟和结构优化设计》的总结报告,另外还参考了其他项目和课题的总结报告以及十多篇相关的博士学位论文以及博士后出站报告等,在此,我衷心感谢国家各相关科技计划、各有关领导单位和主管部门通过许多科研项目给予我们研究工作的长期的财政支持,因为科研毕竟是一项花大钱的差事,尤其是在一块地上反复耕耘!我同时深深感谢为了这个研究做出了许多贡献的同事们、包括研究生同学们,是他们的辛勤工作服务了国家目标,推动了技术进步,也在技术的实践上帮助了我这个一介书生。

写作这本书的时候恰逢中国航空工业开创60周年,北京航空材料研究院也正在准备庆祝建院55周年暨先进复合材料国防科技重点实验室成立15周年,本书是给这些庆典的一份菲薄的献礼。

国防工业出版社的胡翠敏编辑一直鼓励我完成这部著作,借此表达我的谢意。我还要感谢我的妻子张丽东,不论我晚上写到多迟,或是凌晨睡不着,夜游似地爬起来写而影响了她的休息,她都宽容了,甚至还帮我润色了一些词句,纠正一些错别字。

当然,由于我个人的研究火候不够又仓促成书,而一些新理论及其技术体系也还在发展完善的过程当中,书中的瑕疵在所难免,因此诚挚地希望得到读者的批评和指正。

益小苏

2011年元月于久旱无雪的北京环山村

目 录

第 1 章 树脂基复合材料高性能化、冲击损伤与增韧改性	1
1.1 发展的回顾与一些常用的概念	1
1.2 先进树脂基复合材料的代表性增韧技术	7
1.3 复合材料冲击损伤的实验技术与表征技术	28
1.4 液态成型复合材料及其整体化制造技术	41
1.5 本研究的目标与基本创新思路	50
参考文献	52
第 2 章 热固性树脂的温度—时间转换关系与流变行为	56
2.1 环氧树脂的固化温度—时间转换(TTT)关系	57
2.2 环氧树脂的化学流变行为与 TTT- η 关系	66
2.3 双马来酰亚胺树脂的 TTT 关系	74
2.4 双马来酰亚胺树脂的 TTT- η 图	80
2.5 苯并噁嗪树脂的 TTT 关系和 TTT- η 关系	83
2.6 聚酰亚胺树脂的 TTT 关系	88
2.7 小结	91
参考文献	91
第 3 章 热塑性/热固性树脂复相体系的相变特性	93
3.1 热反应诱导相分离的基本理论	93
3.2 分相形貌研究用光学仪器与热塑性增韧材料	98
3.3 热塑性/热固性树脂体系的分相结构特征	101
3.4 热塑性/热固性树脂体系的化学流变学	107
3.5 热塑性/热固性树脂体系分相的时间—温度依赖性	117
3.6 化学结构对反应诱导相分离时间—温度依赖性的影响	129
3.7 热塑性树脂增韧环氧树脂的 TTT 关系	137
3.8 小结	139
参考文献	140
第 4 章 复相体系高分子材料的结构—性能关系	145
4.1 环氧树脂复相体系的典型相结构	146

4.2	苯并噁嗪树脂复相体系的相结构与基本性能	154
4.3	双马来酰亚胺树脂复相体系的典型相结构与基本性能	159
4.4	聚酰亚胺树脂复相体系的典型相结构与性能	166
4.5	无机纳米粒子/聚酰亚胺树脂的结构—性能关系	169
4.6	有机黏土改性高分子复合材料的结构—性能关系	172
	参考文献	182
第5章	“离位”复合增韧概念与层状化界面相结构	185
5.1	“离位”概念的发展背景	187
5.2	热塑性/热固性树脂的层状化界面扩散行为	191
5.3	热塑性/热固性树脂复相体系的相分离建模	195
5.4	热塑性/热固性树脂复相体系的界面相分离模拟	201
5.5	实际热塑性/热固性树脂的层状化界面相结构	203
5.6	热塑性/热固性树脂层状化复合界面结构的优化	214
5.7	小结	218
	参考文献	220
第6章	“离位”复合材料结构—性能关系与基本应用效果	223
6.1	环氧树脂基“离位”增韧复合材料	225
6.2	双马来酰亚胺树脂基“离位”增韧复合材料	234
6.3	苯并噁嗪树脂基“离位”增韧复合材料	239
6.4	聚酰亚胺树脂基“离位”增韧复合材料	242
6.5	“离位”附载增韧预浸料技术及其复合材料基本性能	247
6.6	“离位”附载增韧预浸料的工艺与应用效果初步评价	252
6.7	小结	256
	参考文献	256
第7章	“离位”增韧复合材料的损伤行为与计算机建模分析	258
7.1	静态点压入试验模拟分析损伤过程	260
7.2	碳纤维复合材料层合板的静态点压入—压阻特性	269
7.3	热塑性/热固性树脂复相材料的结构韧性建模分析	276
	参考文献	288
第8章	RTM 液态成型树脂与“离位”RTM 注射技术	291
8.1	环氧树脂 RTM 专用体系	292
8.2	双马来酰亚胺树脂 RTM 专用体系	300
8.3	聚酰亚胺树脂 RTM 专用体系	305
8.4	“离位”RTM 液态注射技术	314
8.5	小结	322

参考文献	324
第9章 液态成型复合材料的“离位”增韧技术	326
9.1 RTM 液态成型复合材料的“离位”增韧原理	327
9.2 “离位”RTM 增韧环氧树脂基复合材料	330
9.3 “离位”RTM 增韧苯并噁嗪树脂基复合材料	333
9.4 “离位”RTM 增韧双马来酰亚胺树脂基复合材料	337
9.5 “离位”RTM 增韧聚酰亚胺树脂基复合材料	347
9.6 “离位”RFI 增韧环氧树脂复合材料	356
参考文献	363
第10章 定型剂材料体系与增强织物的定型预制	365
10.1 定型技术、预制技术与定型剂材料技术	365
10.2 定型剂材料概述	370
10.3 环氧树脂基定型剂的设计、制备与应用	372
10.4 双马来酰亚胺树脂基定型剂的设计、制备与应用	386
10.5 定型技术的新发展	393
10.6 定型预制技术小结	395
参考文献	396
第11章 表面附载增强织物的结构与性能	399
11.1 表面附载增强织物的压缩特性概述	400
11.2 表面附载增强织物的渗透特性	419
11.3 表面附载增强织物的定型特性	434
参考文献	439
第12章 多功能连续化表面附载技术及其预制织物	441
12.1 ES TM - Fabrics 连续化表面附载织物的制备技术	441
12.2 ES TM - Fabrics 织物的表面附载结构和渗透特性	448
12.3 ES TM - Fabrics 多功能织物的定型预制效果评价	452
12.4 小结	458
参考文献	460

第 1 章 树脂基复合材料高性能化、冲击损伤与增韧改性

1.1 发展的回顾与一些常用的概念

20 世纪 60 年代末,高性能碳纤维作为增强纤维实现了初步的商业化,以连续碳纤维增强的高性能树脂基复合材料因此应运而生。本书涉及的“先进复合材料”特指这种连续碳纤维增强的树脂基复合材料^[1]。

飞机结构用先进复合材料技术始于 20 世纪 60 年代到 70 年代,使用的碳纤维主要以日本东丽公司(Toray)研制生产的 T300 为代表,研制发展了受力较小的复合材料结构件如前缘、口盖和整流罩等,波音(Beoing)公司的 B737 飞机扰流片和 B727 飞机的方向舵首先实现这类复合承力制件的装机试用,并制定颁布了 BMS9-8(1977)碳纤维纱和织物的材料标准,揭开了飞机先进复合材料技术应用的序幕。时间序列上,这时的复合材料称得上是第一代飞机复合材料。

20 世纪 70 年代末到 80 年代,先进复合材料开始成规模地进入飞机的次承力结构应用,包括飞行控制面如副翼、升降舵、方向舵和扰流板等,当时的增强纤维材料仍然是 Toray/Amoco 的 T300 和 Hercules 公司的 AS4 碳纤维等,代表性的复合材料有 Narmco 公司的 T300/5208 等。这种复合材料可在 177℃ 环境中使用,主要缺点是吸水性大,在湿热条件下玻璃化转变温度、模量及压缩强度下降严重,复合材料 90° 方向的延伸率小、层间剥离强度低、韧性和耐冲击性能差,对缺口敏感性大,不能满足飞机主翼、尾翼和机身等主承力结构的要求。这种复合材料可以看作是第二代飞机复合材料,采用这些复合材料的机型包括波音公司的 B757、B767、B737-300 以及空中客车(Airbus)公司的 A310、A320 飞机等。

1982 年,波音公司制定了 XBS8-276 预浸料标准,对当时的碳纤维复合材料的性能进行了初步的规范,形成了高强度碳纤维增强复合材料的性能标准,而为了适应适航管理,美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)发布了咨询通报(Advisory Circular, AC, 亦称咨询通告)FAA AC20-107《复合材料飞机结构》,用于指导民机复合材料结构进行适航条例符合性验证。在此基础上,FAA 于 1984 年 4 月正式发布了 AC20-107A 咨询通报《复合材料飞机结构》(Composite Aircraft Structure),以完善复合材料飞机结构适航条例符合性验证方法。

将先进复合材料应用于民用飞机主承力结构的第一个成功尝试是 20 世纪 80

年代后期的 A320 飞机尾翼,这是一个整体加筋的碳/环氧树脂层压板蒙皮,使用的复合材料与用于次承力结构以及飞行控制面的材料相似。这个类型的复合材料技术后来进一步应用到 B737 飞机的平尾、DC - 10 飞机和 A310/320 飞机的垂尾等,整机复合材料的用量大致达到约 15%。

20 世纪 80 年代到 90 年代,东丽公司进一步提升了碳纤维产品的性能,东丽公司 T800H 和 Hercules 公司 IM7 这样的中模量高强度碳纤维新产品面市,其典型应用是波音公司 B777 飞机的复合材料尾翼以及后来其他飞机的机翼、机身、平尾、地板梁、舱门、整流罩、起落架后撑杆和发动机机匣、叶片等,如此,第三代飞机复合材料技术浮出了水面,引领先进复合材料在飞机主承力结构上的应用,航空飞行器真正进入了复合材料时代。1989 年,东丽公司 T800H 碳纤维性能达到波音公司中模量高强度碳纤维 BMS9 - 17 标准指标要求,T800H/3900 - 2 预浸料成为波音公司民机主承力结构复合材料的独家供应商。

到了 21 世纪的前 10 年,先进复合材料飞机应用的两起划时代意义的里程碑当数空客公司的 A380 飞机和波音公司的“梦幻飞机”B787 飞机,其中,在 A380 上(图 1 - 1),先进复合材料用量达到飞机结构用量的 25%,大型复合材料结构件的代是中央翼盒,其复合材料用量达 3t,板厚达 45mm,对接主交点处厚度达 160mm,连接钉直径达 25.4mm,实现减重 1.5t;而 B787 飞机继续选用东丽公司的 Torayca3900/T800S 系列高增韧的环氧树脂基复合材料作为主承力结构用材,部分选用了 Hexcel 公司的 HexMC8552 高增韧环氧树脂基复合材料来制造飞机的大窗框,HexPly8552/AS4 被选用来制造大型复合材料发动机罩等。在 B787 上,先进复合材料的用量高达 50%(图 1 - 2)。

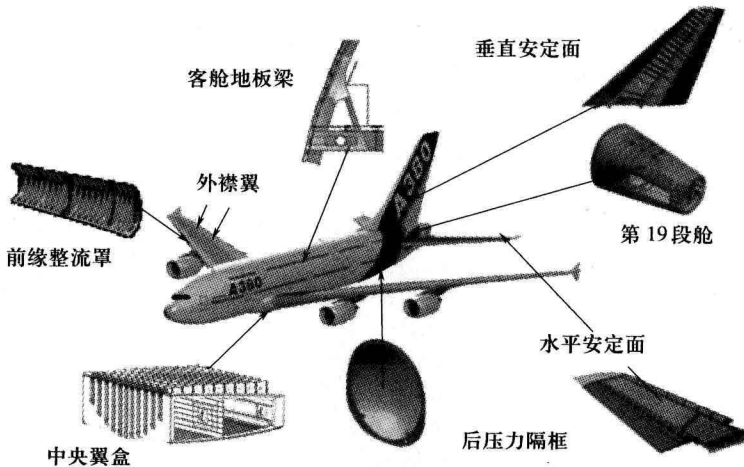


图 1 - 1 A380 飞机及其先进复合材料的使用^[2]

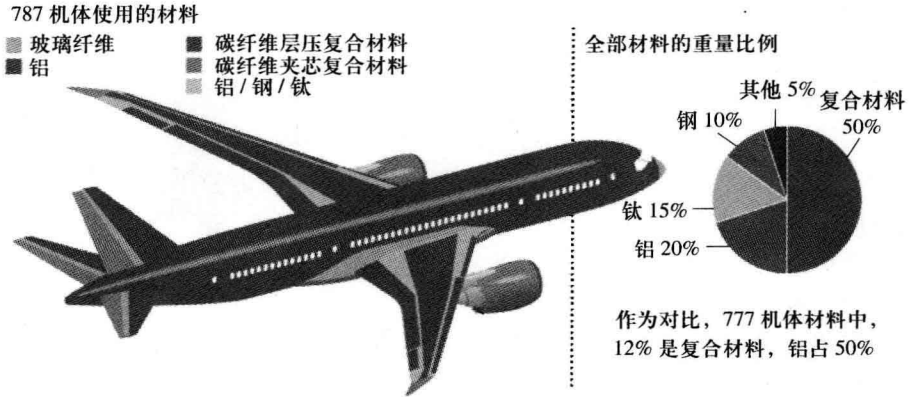


图 1-2 B787 飞机及其先进复合材料的使用
(<http://www.seattlepi.com/boeing/787/787primer.asp>)

从 1984 年到 2009 年, 民机适航指导性文件 FAA AC20-107A《复合材料飞机结构》一直指导着民机复合材料的结构疲劳、损伤容限要求和符合性验证技术等, 2009 年, FAA 发布的 FAA AC20-107B 文件总结了近 20 多年复合材料结构发展和应用的成果和经验, 丰富完善了 FAA AC20-107A 文件。

早在先进复合材料在飞机结构推广应用之初人们就已经发现, 对连续碳纤维增强复合材料层压板的使用性能构成最大威胁的是复合材料的低速冲击分层损伤 (Delamination) 以及由这个损伤带来的压缩强度的大幅度降低, 同时人们还发现, 造成复合材料层压板对冲击分层损伤敏感的主要原因之一是基体树脂的脆性, 因此, 先进复合材料的增韧就成为当时复合材料科学和工程学研究的重要命题。为了评定树脂增韧的成果, 美国国家航天局 (NASA) 先后制定了一系列树脂韧性评定的试验方法, 这就是 NASA RP 1092 和 NASA RP 1142 中给出的 7 项材料试验标准, 随后又制定了复合材料 I 型 (G_{IC}) 和 II 型 (G_{IIC}) 层间断裂韧性的测试标准, 其中最重要的是冲击后压缩强度 (Compression After Impact, CAI) 的定义及其测试标准等。后来, 随着复合材料用于飞机主承力结构的机翼和机身, 要求复合材料的压缩许用应变值从 $4000\mu\epsilon$ 提高到 $6000\mu\epsilon$, 人们又发现, 目视勉强可见^[3] (Barely Visible Impact Damage, BVID) 的冲击损伤限制了复合材料设计许用值的提高。

下面我们引用有关这几个概念的定义及其描述的主要内容。

(1) 韧性与增韧 (Toughness and toughening): “韧性是材料的一种力学性能, 是反映材料抗断裂能力的一种性能; 韧化即提高韧性的方法^[4]” (肖纪美, 1993)。

高分子“材料的韧性和脆性是宏观的力学性能, 是工程上的概念, 它随测试条件 (如温度、速度、试样几何尺寸等) 而异。此外, 韧性和脆性又与材料的破坏方式 (屈服、银纹) 有关, 而屈服和银纹是微观力学上的概念, 虽然它们也随测试方法和

条件而异,但能较好地反映材料的破坏本质,与材料的结构有较好的相关性^[5]”(漆宗能,1993)。

度量材料韧性的主要常规力学参数是断裂应变能、冲击韧性如 a_k ,以及断裂力学的裂纹扩展单位面积所需的能量参数如 G_{IC} 、 J_{IC} 等。

20 世纪 80 年代开始,出于对先进树脂基复合材料冲击分层损伤和基体树脂韧性的严重关注,有关先进复合材料冲击损伤和韧性的测试、表征和分析一时成为当时复合材料技术研究的热点,至今不衰,其中,两个基本的概念就是损伤阻抗和损伤容限。损伤阻抗当时被粗略地定义^[6]为“一个事件如冲击造成的材料损伤”;损伤容限则被定义为“一个给定的损伤状态下对结构性能的影响”。时至今日,损伤阻抗和损伤容限的精确定义如下^[7]:

(2) 损伤阻抗 (Damage resistance): 在结构和结构力学中,指与某一事件或一系列事件相关的力、能量或其他参数和所产生的损伤尺寸及类型之间关系的一个度量。

如果给定材料的损伤尺寸或类型不变,则损伤阻抗随力、能量或其他参数的增加而增加;反之,施加给定的力、能量或其他参数,则材料的损伤阻抗随损伤的减小而增加。

对于高损伤阻抗的材料或结构,给定的事件只会造成较小的物理损伤;而对于高损伤容限的材料或结构,尽管可以造成其不同程度的损伤,但它们仍然具有很高的剩余功能。

损伤阻抗型的材料或结构可以是、也可以不是损伤容限型的。

(3) 损伤容限 (Damage tolerance): ①在结构和结构力学中,损伤的尺寸和类型与该材料或结构在特定载荷条件下的性能参数如强度或刚度水平之间关系的一个度量;②在结构系统中,当存在有特定或规定的损伤水平时,这个体系在指定的性能参数如幅值、时间长度和载荷类型条件下运行而不破坏的能力。

损伤容限涉及并能用一些因素来表达,如该材料、结构或整个系统所承受的不同水平的载荷等,具体讲,①基础材料存在损伤时的工作能力,常常称为剩余强度问题;②材料或结构所表现出来的损伤扩展阻抗或包容能力;③系统的检测和维护计划,它允许损伤被检出和纠正,并取决于材料、结构和使用的考虑。

对给定的材料或结构的性能参数水平,损伤容限随损伤尺寸的增加而增加;反之,对于给定的损伤尺寸,损伤容限随性能参数水平的增加而增加。

损伤容限取决于施加的载荷类型,例如压缩载荷的损伤容限通常不同于同样水平拉伸载荷的损伤容限。

损伤容限常常与损伤阻抗相混淆,损伤容限直接而且只与损伤尺寸和类型有关,而与损伤是如何产生的不直接相关,因此,损伤容限与损伤阻抗是截然不同的。

(4) 冲击后压缩强度 (Compression After Impact, CAI): 对航空级别的复合材