

帅朝林 等著

飞机结构件 先进制造技术 从数字化到智能化

**Advanced Manufacturing
Technology
For Aircraft Structural Parts
From Digital to Intelligent**



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

飞机结构件先进制造技术

——从数字化到智能化

帅朝林 刘大炜 牟文平 等著



机械工业出版社

本书系统总结了飞机结构件数字化制造的研究成果和实践经验。全书共分3篇,第1篇为飞机结构件数字化制造现状,分别对飞机结构件的发展、数字化制造技术和数字化装备飞机结构件进行了概述,第2篇为数字化制造关键技术,分别对数字化工艺设计技术、加工过程监控技术、数字化设备保障技术与生产过程数字化管控技术进行了介绍和论述,第3篇为飞机结构件智能制造探索,作者结合自身近年来在飞机结构件智能制造方面开展的研究与应用经验,分别对智能制造的资源保障解决方案、生产执行解决方案以及过程管控解决方案进行了详细论述。

本书可为飞机结构件制造领域的工程技术人员提供指导,也可作为高等院校相关专业的教师和研究生的参考书,还可供从事智能制造研究的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

飞机结构件先进制造技术:从数字化到智能化/帅朝林等著.
—北京:机械工业出版社,2019.2
ISBN 978-7-111-61817-1

I.①飞… II.①帅… III.①数字技术—应用—飞机构件—制造 IV.①V222-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第302494号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:孔劲 责任编辑:孔劲 徐强

责任校对:张薇 封面设计:鞠杨

责任印制:孙炜

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

2019年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15.75印张·2插页·381千字

标准书号:ISBN 978-7-111-61817-1

定价:129.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前言

1952 年第一台数控机床在美国麻省理工学院诞生,自此开启了数字化制造的篇章。随着计算机技术、软件技术、装备制造技术和制造工艺技术的不断发展,数字化制造的外围和深度不断得到延伸。目前,在汽车、制药等典型流程化生产中,数字化制造技术已经被广泛应用,并极大地改善了产品质量、生产效率和制造环境,为相关企业带来了巨大的成功,但是,在诸如飞机结构件制造等高度离散的生产环境中,因为需要攻克诸多个性化难题,因而数字化制造技术发展依然较为缓慢。

面对这些技术挑战,国内航空制造企业和科研院所既看到了飞机结构件数字化制造所面临的重重困难,更看到数字化技术在飞机结构件制造领域应用的必然趋势和其背后所蕴藏的巨大发展前景,因此,自 20 世纪 90 年代中期,国内航空制造企业就开始围绕飞机结构件数字化制造开展相关的技术研究和应用工作。依托多个型号项目攻关任务,大力推进以基于特征识别的快速编程技术、在线检测技术、数控机床保障技术、生产现场管控技术等为代表的数字化制造技术的研究和应用,实现了飞机结构件制造过程中的数字化工艺设计、数字化装备保障、制造过程信息管控等方面的技术突破,提升了飞机结构件的加工效率和精度,促进了飞机结构件制造模式的转变,为缩短飞机型号任务研制周期提供了有力技术支撑。

近年来,为响应“中国制造 2025”战略规划落地,国内航空制造企业进一步围绕飞机结构件制造过程中的智能资源保障、智能生产执行及制造过程智能管控等方向开展了大量研究和实践工作,实现了飞机结构件制造的计划排程智能化、加工过程无人化、物流配送自动化,初步实现了飞机结构件数字化车间的建设和运行,并对在这一过程中所形成的一系列数字化制造技术成果,例如,智能编程系统、通用后置处理软件、数字化车间解决方案等,进行了推广应用,有效促进了国家军民融合战略的落地。

希望通过总结、分享本书作者在飞机结构先进制造领域方面的研究成果和工程实践经验,为国内航空制造企业提供技术参考,并为航天、船舶、兵器、汽车等行业的结构件制造企业提供有益建议。与本书基础理论及应用技术相关的科研项目有:“国产高档数控机床在典型飞机结构件加工中的示范应用”国家科技重大专项(2010ZX04015-011)、“国产高档数控机床与数控系统在飞机筋肋梁等加工单元中的应用”国家科技重大专项(2013ZX04001-021)、“国产五轴联动数控机床柔性生产线及生产单元飞机结构件应用示范基地”国家科技重大专项(2015ZX04001-002)、“用于钛合金壁板、复合材料等典型零件加工的高速立式五轴数控机床研制及自动化生产线示范应用”国家科技重大专项(2017ZX04002-001)、“飞机大型复杂结构件数字化车间”2015 工信部智能制造新模式应用项目等。

本书由帅朝林、刘大炜、牟文平、宋戈、朱绍维、熊青春、李杰、陈学振所著。书中荟萃了航空制造研究院所与企业在飞机结构件数字化制造技术领域的先进理论成果和工程实践经验,概述了飞机结构件数字化制造的现状,重点介绍了飞机结构件数字化制造关键技术,并对飞机结构件智能制造进行了探索。本书既可以供相关制造行业的科技工作者使用,也可作为航空制造相关专业的教材和参考书使用。

真诚地希望通过本书,使读者了解与飞机结构件制造相关的知识,在深入研究数字化

制造技术的基础上，对如何实现复杂飞机结构件的优质、高效、低成本加工产生更深刻的理解和认识。

在此，谨对写作过程中给予支持的西北工业大学、南京航空航天大学、电子科技大学，以及参与本书撰写、编辑与校对的工作人员表示衷心感谢。

限于作者的水平，书中难免有不妥之处，诚恳希望专家和读者批评指正。

帅朝林

航空工业成都飞机工业（集团）有限责任公司

目 录

前 言

第1篇 飞机结构件数字化制造现状	1
第1章 飞机机构件发展概述	2
1.1 飞机结构件的特点	3
1.2 飞机结构件的材料	4
1.2.1 材料性能要求	4
1.2.2 常用材料类型	5
1.3 飞机结构件的整体化	8
1.4 飞机结构件加工的难点	9
1.5 飞机结构件的发展趋势	10
第2章 数字化制造技术概述	12
2.1 数字化制造的概念	12
2.1.1 数字化制造的定义与内涵	13
2.1.2 数字化制造涉及的主要内容	17
2.1.3 实施数字化制造的重大意义	23
2.2 数字化制造的发展历程	25
2.2.1 数字化制造的诞生与发展	25
2.2.2 数字化制造的应用	33
2.2.3 数字化制造的发展方向	42
第3章 数字化制造装备概述	44
3.1 数字化制造装备的特点	44
3.2 数字化制造装备的分类	45
3.2.1 按加工工艺及机床用途分类	45
3.2.2 数控切削类机床的分类	47
3.2.3 数控切削类机床的选用	51
3.3 数字化制造装备的发展	55
3.3.1 传统数控机床的发展	55
3.3.2 高端数字化制造装备现状	58
3.3.3 数控机床的发展趋势	63
第2篇 飞机结构件数字化制造关键技术	67
第4章 数字化工艺设计技术	68
4.1 工装技术	68
4.1.1 飞机结构件装夹技术现状	68

4.1.2	基于特征的飞机结构件装夹方案设计	68
4.1.3	面向飞机结构件柔性生产线的装夹方案	74
4.2	刀具技术	77
4.2.1	发展状况及应用情况	77
4.2.2	刀具材料	78
4.2.3	飞机结构件数控加工刀具种类	79
4.2.4	飞机结构件数控加工刀柄系统	81
4.3	高速高效切削技术	83
4.3.1	高速高效切削技术应用现状	83
4.3.2	铝合金结构件高效切削技术	84
4.3.3	钛合金结构件高效切削技术	87
4.3.4	复合材料的高效切削技术	89
4.4	数控编程	92
4.4.1	发展历程	92
4.4.2	数控编程现状	93
4.4.3	基于特征的智能数控编程技术	94
4.5	后置处理	103
4.5.1	后置处理概述	103
4.5.2	后置处理技术内容	103
4.5.3	后置处理发展历程	105
4.5.4	睿思后置处理软件	106
第5章	加工过程监控技术	116
5.1	刀具状态监控技术	116
5.1.1	重要性及监控方式概述	116
5.1.2	刀具寿命预测及管理	116
5.1.3	刀具磨损破损监测	119
5.2	零件加工精度在机测量技术	120
5.2.1	零件测量方式概述	121
5.2.2	在机检测技术现状及发展趋势	121
5.2.3	基于特征的在机检测技术	122
第6章	数字化设备保障技术	137
6.1	数控机床精度检测与补偿技术	137
6.1.1	误差源分析	137
6.1.2	几何误差检测	138
6.1.3	几何误差补偿	142
6.1.4	热误差检测与补偿	144
6.1.5	基于试件的误差评价	146
6.2	预防性维修技术	149
6.2.1	预防性维修的意义	149

6.2.2 预防性维修的方法	149
6.3 设备故障预警与故障诊断技术	150
6.3.1 机床故障的诊断与维护	150
6.3.2 智能故障诊断技术	154
第7章 生产过程数字化管控技术	158
7.1 数字化生产管控中心架构	158
7.2 智能生产计划排程技术	160
7.2.1 订单管理	161
7.2.2 工艺规程管理	163
7.2.3 约束管理	163
7.2.4 排程管理	163
7.3 加工过程数据采集技术	165
7.4 制造资源保障技术	166
7.5 作业调度技术	167
7.6 数字化管控体系构建	169
7.6.1 当前数控加工过程管控存在的问题	169
7.6.2 数字化管控体系构建总体思路	170
第3篇 飞机结构件智能制造探索	173
第8章 智能制造资源保障解决方案	175
8.1 面向智能制造的工艺支撑技术	175
8.1.1 面向智能制造的工艺方案优化	175
8.1.2 基于特征和知识的智能工艺决策系统	178
8.1.3 基于特征的智能编程技术	183
8.1.4 面向自适应加工的仿真技术	185
8.1.5 快速装夹技术	190
8.2 面向智能制造的设备运行保障体系	192
8.2.1 智能车间设备精度保障技术	192
8.2.2 设备信息化管理系统开发	197
8.3 面向智能制造的生产资源保障技术	199
8.3.1 物流控制系统	199
8.3.2 工装管理系统	201
8.3.3 刀具管理系统	203
8.3.4 加工过程控制系统	204
第9章 智能制造生产执行解决方案	206
9.1 总体技术路线	206
9.2 物流自动化条件建设	206
9.2.1 自动上下料系统	206
9.2.2 自动换刀系统	207

9.2.3	刀具/物料自动运输系统	207
9.2.4	快速定位与装夹系统	208
9.2.5	机外集中装卸平台	209
9.2.6	自动防护门	210
9.2.7	物流控制系统	210
9.3	刀具寿命管理及状态监控	211
9.3.1	刀具寿命预测及管理	211
9.3.2	刀具防错及磨损破损状态监控	212
9.4	加工过程检测及分析	213
9.4.1	基于接触式探头的快速找正	213
9.4.2	基于特征的加工状态在线检测	213
9.4.3	基于检测结果的 SPC 数据分析与质量控制	216
9.4.4	基于在机检测的自适应控制	218
第 10 章	智能制造过程管控解决方案	221
10.1	智能排程与调度	222
10.1.1	提取系统基础信息	222
10.1.2	智能排程方法	222
10.1.3	动态调度方法	224
10.1.4	智能排程与动态调度方案验证及优化	224
10.1.5	智能排程与动态调度系统	225
10.2	虚拟三维生产线建模与仿真	227
10.2.1	虚拟生产线建模与仿真模块	228
10.2.2	开发模式与开发平台	229
10.2.3	虚拟生产线建模与模型库	230
10.2.4	虚拟生产线运行管理	231
10.3	生产过程数据处理及可视化监控	232
10.3.1	生产过程数据处理与可视化监控模块	232
10.3.2	运行数据处理与显示	232
10.3.3	统计数据处理与显示	233
10.3.4	关键指标数据处理与显示	234
10.3.5	数据显示方式及具体形式	234
10.4	生产线管控数据管理平台	234
10.4.1	内外部接口数据管理	235
10.4.2	生产计划与准备	236
10.4.3	生产运行过程数据管理	236
10.5	数控系统监控	237
10.5.1	加工过程数据采集	237
10.5.2	数据处理与传输网络	238
10.5.3	数控机床加工控制	239
参考文献		240

第 1 篇

飞机结构件数字化制造现状



第1章

飞机机构件发展概述

飞机机体主要由内部骨架和表面蒙皮组成，具有维持飞机气动外形，承受使用过程中各种力学载荷的作用。内部骨架则主要包括框、肋、梁等多种类型的结构件，其中框、梁类结构件尺寸最大、占比最多。随着材料技术、制造技术的迅速发展，现代国防建设对主力战斗机提出了轻量化、长寿命、易维护等要求，使得机体结构件向整体化、薄壁化、承载强与功能复杂化等方向发展。因此，越来越多的结构件采用了整体化设计，典型代表就是将以前通过数十个零件机械连接而成的框改为一个大型整体框（见图 1.1.1），不仅大幅减少了零件数量，而且增加了结构强度，减轻了结构重量。

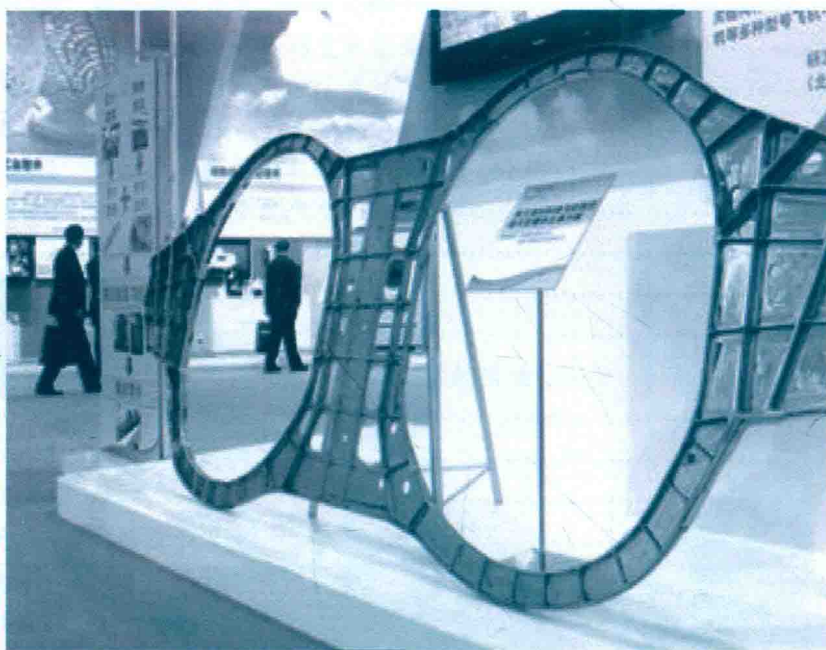


图 1.1.1 某型飞机大型整体框

飞机结构件具有刚性好、强度大、重量轻、气密性好、形位精度高等要求，这些要求使得结构件有型腔复杂、壁薄、自由曲面多、加工精度高等多种特征，从而也决定了其加工工艺的特殊性。根据结构特点的不同，飞机结构件大致可分为 5 大类：框类零件、梁类零件、壁板类零件、接头类零件和肋类零件，部分典型零件如图 1.1.2 所示。

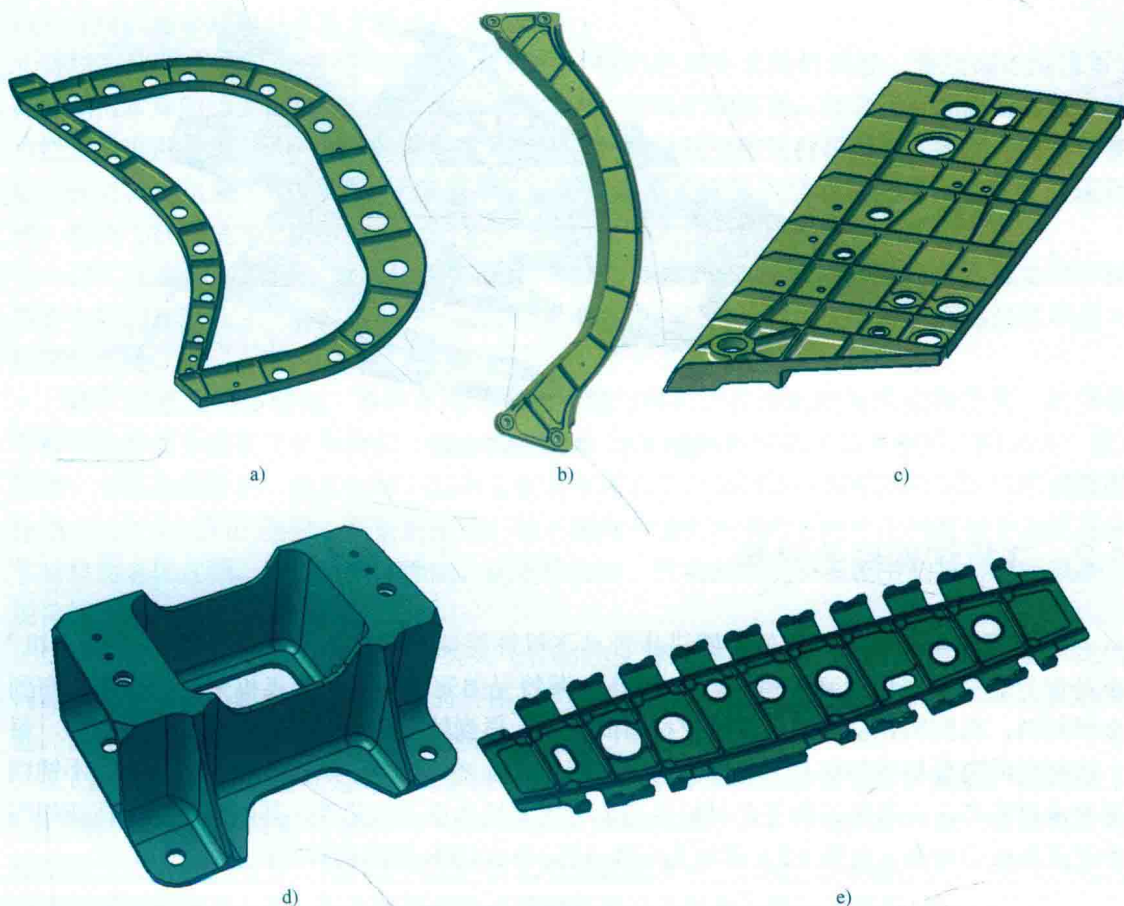


图 1.1.2 部分典型飞机整体结构件

a) 框 b) 梁 c) 壁板 d) 接头 e) 肋

1.1 飞机结构件的特点

在现代飞机设计制造中,为提高机体结构的强度和可靠性,飞机结构件主要采用整体毛坯件和整体薄壁框架结构,加工过程中材料去除量非常大,大部分结构零件的材料去除率达95%以上,部分零件甚至达到98%(图1.1.3所示为飞机结构示意图)。与以往小型结构件焊、铆接的组装模式相比,这种大型结构件的整体式制造方法可以大量减少零件数量和装配连接工序,并且能够有效减轻飞机整机重量,提高零件的强度和可靠性,显著提高飞机的制造质量。

飞机结构件的加工要求受到诸多因素的影响。一方面,飞机结构件外形与飞机的气动外形密切相关,为保证飞行性能,结构件的加工具有很高的轮廓精度要求。另一方面,结构件周边轮廓与其他零件有复杂的装配协调关系,为便于装配,结构件的加工具有很高的形位和尺寸精度要求,如腹板最高精度达到 $\pm 0.1\text{mm}$ 。此外,薄壁加筋的结构特点使得零件局部刚性弱,筋顶结构复杂,壁厚最薄部位不足1mm。



图 1.1.3 飞机结构示意图

1.2 飞机结构件的材料

一百多年来，材料技术的不断进步推动飞机性能地不断发展，“一代材料，一代飞机”正是世界航空发展史的真实写照。从 1903 年莱特兄弟驾驶的第一架飞机采用的木头和布到金属材料，再到铝合金成为机体航空材料的主流，再到钛合金成为飞机制造的主要材料，每一次材料的交替与更新都是飞机性能的一次跨越式发展。如今，除钛合金、铝合金、不锈钢等合金材料外，大量先进的复合材料也逐步运用于机体承力结构件，其刚度和强度性能相当于甚至超过铝合金，如图 1.2.1 所示为空客 A350-900XWB 使用材料分析图。

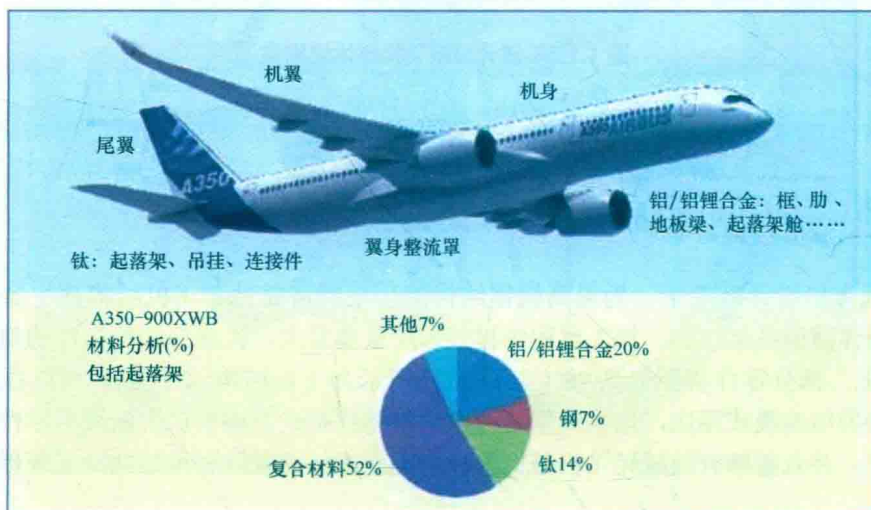


图 1.2.1 空客 A350-900XWB 使用材料分析图

1.2.1 材料性能要求

飞机苛刻的工作条件给结构件的材料性能提出了极高的要求，针对不同的功能和类型，

结构件材料通常具有以下几个特点。

(1) 比强度和比刚度高 对飞机结构件材料的基本要求是材质轻、强度高、刚度好。减轻飞机本身的结构重量就意味着增加运载能力,提高机动性能,加大飞行距离或射程,减少燃油或推进剂的消耗。因此,比强度和比刚度是衡量航空航天材料力学性能优劣的重要参数。此外,飞机除了受静载荷的作用外还要经受起飞、降落、发动机振动、转动件高速旋转、机动飞行和突风等因素产生的交变载荷,材料的疲劳性能也受到人们的极大重视。

(2) 优良的耐高温特性 对机身材料,气动力加热效应使表面温度升高,需要结构材料具有好的高温强度。对发动机材料,要求涡轮盘和涡轮叶片材料要有好的高温强度和耐高温腐蚀性能。

(3) 耐老化和耐腐蚀 各种介质和大气环境对材料的作用表现为腐蚀和老化。航空航天材料接触的介质是飞机用燃料(如汽油、煤油)、火箭用推进剂(如浓硝酸、四氧化二氮、肼类)和各种润滑剂、液压油等,其中多数对金属和非金属材料都有强烈的腐蚀作用或溶胀作用。大气中太阳的辐射、风雨的侵蚀、地下潮湿环境中长期贮存时产生的霉菌会加速高分子材料的老化过程,所以耐腐蚀性能、抗老化性能、抗霉菌性能也是航空航天材料应该具备的良好特性。

(4) 寿命长,安全性高 作为载人飞行器的支撑材料,其寿命和安全性是首要考虑的问题。特别是在不断减少飞机重量的条件下,绝对不能忽视因重量的减轻而导致安全性的降低,因此长寿命和高安全性的航空材料至关重要。

(5) 成本低 新型号先进飞机价格不断攀升,各国家和地区都先后对航空产品提出了“买得起”的要求。而材料在航空产品的成本和价格构成中占有相当大的份额,所以科学地选材和努力发展低成本的材料是航空材料发展的重要方向。同时很多民航飞机,作为普通民众所要使用的交通工具,努力降低成本也是实现“以人为本”的一项要求。

1.2.2 常用材料类型

(1) 钛合金 钛合金是一种比强度高、耐热性和耐蚀性好的材料,20世纪50年代以来在航空航天领域得到了广泛应用。随着现代飞机超音速巡航能力、高机动性和敏捷性等设计要求,使得钛合金材料使用的比例不断增加,例如,美国的F-22战斗机机体重量中钛合金比例已经达到41%,在航天飞机中,钛合金的比例更是高达90%左右。

钛是同素异构体,熔点为 1668°C ,在低于 882°C 时呈密排六方晶格结构,称为 α 钛,在 882°C 以上呈体心立方晶格结构,称为 β 钛。利用钛的上述两种结构的不同特点,添加适当的合金元素,使其相变温度及相分含量逐渐改变而得到不同组织的钛合金。室温下,钛合金有三种基体组织,钛合金也就分为以下三类: α 合金、 $\alpha+\beta$ 合金和 β 合金,我国分别以TA、TC、TB表示。

1) α 钛合金是 α 相固溶体组成的单相合金,不论是在一般温度下还是在较高的实际应用温度下,均是 α 相,组织稳定,耐磨性高于纯钛,抗氧化能力强。在 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ 的温度下,仍保持其强度和抗蠕变性能,但不能进行热处理强化。

2) β 钛合金是 β 相固溶体组成的单相合金,未热处理即具有较高的强度,淬火、时效后合金得到进一步强化,室温强度可达 $1372\sim 1666\text{MPa}$ 。但其热稳定性较差,不宜在高温下使用。

3) $\alpha+\beta$ 钛合金是双相合金,具有良好的综合性能,组织稳定性好,有良好的韧性、塑性和高温变形性能,能较地进行热压力加工,能进行淬火、时效使合金强化。热处理后的强度约比退火状态提高 50% ~ 100%,高温强度高,可在 400 ~ 500℃ 的温度下长期工作,其热稳定性次于 α 钛合金。

三种钛合金中最常用的是 α 钛合金和 $\alpha+\beta$ 钛合金。 α 钛合金的切削加工性最好, $\alpha+\beta$ 钛合金次之, β 钛合金最差。钛合金的加工性能差主要是因为其化学活性大、导热性差,具体原因如下。

1) 化学活性大。钛合金与大气中 O、N、H、CO、CO₂、水蒸气、氨气等产生强烈的化学反应。含碳量大于 0.2% 时,会在钛合金中形成硬质 TiC。温度较高时,与 N 作用也会形成 TiN 硬质表层。在 600℃ 以上时,钛吸收氧形成硬度很高的硬化层。氢含量上升,也会形成脆化层。吸收气体而产生的硬脆表层深度可达 0.1 ~ 0.15mm,硬化程度为 20% ~ 30%。钛的化学亲和性也大,易与摩擦表面产生黏附现象。

2) 导热性能差。钛的导热系数 $\lambda=15.24\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,约为铁的 1/5,铝的 1/14,而各种钛合金的导热系数比钛的导热系数约下降 50%。钛合金的弹性模量约为钢的 1/2,故其刚性差、易变形,切削时加工表面的回弹量很大,约为不锈钢的 2 ~ 3 倍,造成刀具后刀面的剧烈摩擦、黏附、粘结磨损。

钛合金是典型的难加工材料。相同状态下,钛合金的主切削力比 45 钢的小 20% 左右,但由于切屑与前刀面的接触长度极短,单位接触面积上的切削力大大增加,容易造成崩刃。而且,钛合金的弹性模量小,加工时“让刀现象”明显,容易引起振动,加快刀具磨损。另外,钛的化学活性大,冷硬现象严重,在高的切削温度下,很容易吸收空气中的氧和氮造成表面硬化,降低零件的疲劳强度,加剧刀具磨损。而在刀具磨损的情况下重复切削,切削力和切削热都会产生骤变,容易产生烧伤的情况。

(2) 铝合金 铝合金密度低,但强度比较高,接近或超过优质钢,塑性好,具有优良的导电性、导热性和耐蚀性,工业上广泛使用,使用量仅次于钢。一些铝合金可以采用热处理获得良好的力学性能、物理性能和抗腐蚀性能。硬铝合金属 AlCuMg 系一般含有少量的 Mn,可热处理强化,其特点是硬度大,但塑性较差。超硬铝属 AlCuMg-Zn 系可热处理强化,是室温下强度最高的铝合金,但耐腐蚀性差,高温软化快。锻铝合金主要是 AlZnMgSi 系合金,虽然加入元素种类多,但是含量少,因而具有优良的热塑性,适宜锻造,故又称锻造铝合金。

各种飞机都以铝合金作为主要结构材料。飞机上的蒙皮、梁、肋、桁条、隔框和起落架都可以用铝合金制造。飞机根据用途的不同,铝的用量也不一样。着重于经济效益的民用机因铝合金价格便宜而大量采用,如波音 767 客机采用的铝合金约占机体结构重量 81%。军用飞机因要求有良好的作战性能而相对减少了铝的用量,如最大飞行速度为马赫数 2.5 的 F-15 高性能战斗机仅使用 35.5% 的铝合金。

(3) 不锈钢 不锈钢强度高,由于在空气、蒸汽、水等弱腐蚀介质中有很强的耐蚀性以及较好的耐高温特性,常用于飞机系统高温管路和油箱部位受力大的构件,飞机结构件常用的不锈钢主要有 Ph3-8Mo、1Cr18Ni9Ti 等。

碳在奥氏体不锈钢中是强烈形成并稳定奥氏体且扩大奥氏体区的元素。碳形成奥氏体的能力约为镍的 30 倍,碳是一种间隙元素,通过固溶强化可显著提高奥氏体不锈钢的强度。碳

还可提高奥氏体不锈钢在高浓氯化物（如 42% MgCl_2 沸腾溶液）中的耐应力、耐腐蚀的性能。

在奥氏体不锈钢中，碳也常常被视为有害元素，这主要是由于在不锈钢的耐蚀用途中的一些条件下（比如焊接或经 450 ~ 850℃ 加热），碳可与钢中的铬形成高铬的 Cr_{23}C_6 型碳化物从而导致局部铬的贫化，使钢的耐蚀性特别是耐晶间腐蚀性能下降。因此，20 世纪 60 年代以来新发展的铬镍奥氏体不锈钢大都是碳含量小于 0.03% 或 0.02%，可以知道，随着碳含量降低，钢的晶间腐蚀敏感性降低，当碳含量低于 0.02% 时才具有最明显的效果。一些实验还指出，碳还会增大铬奥氏体不锈钢的点腐蚀倾向。由于碳的有害作用，不仅在奥氏体不锈钢冶炼过程中应按要求控制尽量低的碳含量，而且在随后的热、冷加工和热处理等过程中也应防止不锈钢表面增碳，且应避免铬的碳化物析出。

（4）复合材料 复合材料与金属、高聚物、陶瓷并称为四大材料。复合材料是有机高分子、无机非金属或金属等几类不同材料通过复合工艺组合而成的新型材料，它既保留了原组分材料的主要特色，又通过复合效应获得原组分所不具备的性能，与一般材料的简单混合有本质的区别。

由于复合材料具有重量轻，较高的比强度、比模量，较好的延展性，抗腐蚀、导热、隔热、隔声、减振、耐高（低）温，以及独特的耐烧蚀性、透电磁波、吸波隐蔽性、材料性能的可设计性、制备的灵活性和易加工性等特点，在现代飞机结构中得到了广泛的采用。如图 1.2.2 所示为复合材料在商用飞机中的应用情况，作为空客的先进客运机型，其机身、机翼、尾翼、翼身整流罩等多个关键部件均大量采用了复合材料，其比例甚至超过了一半以上，远远高于其他常用金属合金。以下介绍几种常用的复合材料。

1) 蜂窝芯。蜂窝芯是一种采用铝箔、织物或纸质材料（芳纶纸）等通过胶接加工的六边形或矩形格子形状的轻质芯复合材料。如图 1.2.3 所示为一种典型六边形蜂窝芯，通常铝箔或芳纶纸的厚度仅有 0.03 ~ 0.07mm，六边形格子的边长一般为 2.5 ~ 14.7mm。蜂窝是轻质材料，质量的可设计范围较宽，变化蜂窝的格孔大小、壁厚和浸渍树脂的含量，可以得到不同密度的蜂窝。

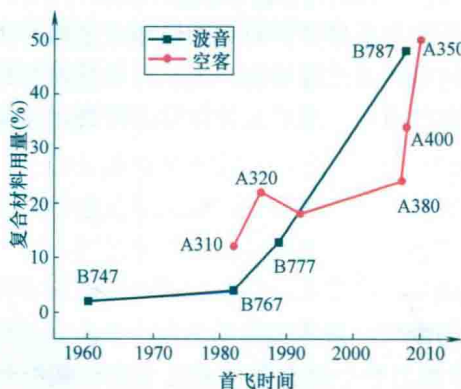


图 1.2.2 复合材料在商用飞机中的应用情况

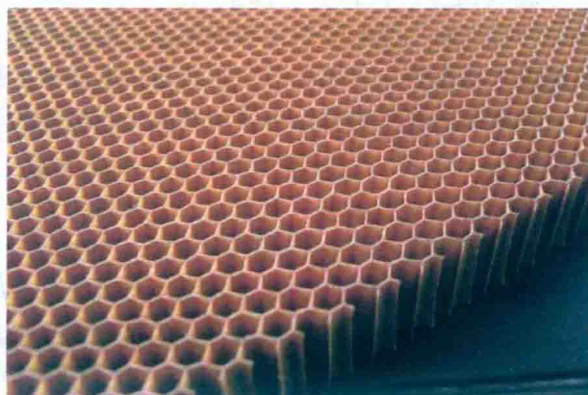


图 1.2.3 芳纶蜂窝芯

蜂窝芯用于飞机的机头雷达罩、机翼前缘、尾翼、腹鳍、内外侧升降副翼、鸭翼和后缘面板、机身地板等部件中。蜂窝芯材料制作完成后，绝大多数情况下需要进行一定的切割加工，以满足装配、连接等要求，所以蜂窝芯复合材料的切割加工是蜂窝材料制品从研制到

应用中的一个重要环节。与金属材料相比,蜂窝材料的力学性能有很大的差异,主要表现为材料在平面内结构不连续,因而无法承受面内的拉压载荷,而在垂直于平面的轴向,能承受很强的拉压载荷。

2) 碳/碳复合材料。随着新一代航空航天器向高超声速方向的发展,苛刻的超高温服役环境对材料及结构的承载与隔热提出了严峻考验,碳/碳复合材料是适应这种需求的重要候选材料。碳/碳复合材料依据碳纤维增强相结构可分为碳毡碳/碳复合材料和多向编织碳/碳复合材料。

作为一种新型战略材料,在美、俄、法、英、日等国家,其研制发展主要由空军、海军或政府预算中给予支持,因此,碳/碳复合材料的国防专用性和强烈的军事背景使其研制和使用具有高度的机密性。碳基隔热复合材料主要用于烧蚀隔热和热结构,较好地解决了轻质化、抗热震、耐侵蚀等技术难题。除了传统的碳/碳复合材料以外,近年来,美、俄、法等国家又开发了许多混杂其他材料的新型碳/碳材料,以满足不同的特殊使用要求,例如,在碳/碳材料中混入 Si_3N_4 、 SiC 、 TiC 、 TaO 、 TaC 等粉末,以提高碳/碳材料抗粒子侵蚀性能。

3) 透波复合材料。透波复合材料主要分为有机树脂基透波复合材料和陶瓷基透波复合材料两大类。有机树脂基透波复合材料具有强度高、质轻和介电性优良等特点,成为低马赫数飞行器天线罩的首选材料。复合材料增强纤维由最初的普通玻璃纤维发展到S玻璃纤维、D玻璃纤维、E玻璃纤维、高硅氧玻璃纤维、石英玻璃纤维和各种芳纶纤维等。基体树脂为聚酯树脂、环氧树脂、酚醛树脂、双马树脂、聚苯丙咪唑、聚酰亚胺树脂、硅树脂、聚四氟乙烯、氰酸酯树脂以及各种树脂的改性产物。目前,先进有机树脂基透波复合材料在国外战机上广泛应用,如F-22战斗机、JSF战斗机和EF2000战斗机等。为提高有机树脂基透波复合材料的使用温度,国外近期在有机/无机杂化树脂方面开展了大量的研究工作。美国报道了一种以硅为主链的树脂(DI系列树脂),石英纤维增强的DI树脂复合材料在 538°C 下保持很高的拉伸强度,介电性能在 850°C 以下保持稳定,已被用于制造耐温 500°C 以上的夹层结构宽频带天线罩。

随着复合材料在新一代军民机中的大量应用,极大地提升了飞机的技术性能。然而,与此同时也给飞机的零部件制造带来了新的难题,这是因为复合材料的切削原理与金属的切削原理大不相同,其切削刃产生切屑并非像大多数金属那样通过剪切而产生,而是通过折断来去除多余的复合材料。不同种类的复合材料的加工也不相同,而且复合材料的种类比金属材料更为广泛。

1.3 飞机结构件的整体化

整体结构件的广泛应用对飞机的制造产生了深远的影响,具体包括以下几个方面。

(1) 大大减少了机体零件数量 原来需要几百甚至上千个钣金零件通过连接件装配起来的梁、框、肋和壁板等组件,采用整体结构形式后只需几个零件即可。现代飞机整体结构件数量比传统分布式的结构零件数量减少二分之一左右,其工艺装备数量也相应大大减少,从而使新机的试制生产工作量减少,周期缩短,生产技术管理工作也更加简化。

(2) 减少了飞机装配工作量 由于大量采用整体结构,使得装配工作量大为减少,过去F-14的生产工时中65%用于整机装配,35%用于零件加工。装配工序中手工劳动量大,