

钣金件数字化 制造技术

王俊彪 刘 闯 王永军 张贤杰 著

 *Banjīnjiàn Shùzìhuà Zhìzào Jìshù*



國防工業出版社

National Defense Industry Press

1638-39

钣金件数字化制造技术

王俊彪 刘 闯 王永军 张贤杰 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

钣金件是航空航天产品的主要结构件,钣金件制造技术水平反映了航空航天产品研制和生产的基础能力。本书从钣金件数字化制造的内涵出发,在分析钣金件制造过程特性的基础上,刻画了钣金件数字化制造系统模型和模式;介绍了钣金件制造模型、知识重用的理论和方法,分别对钣金件展开、回弹修正、工艺设计、成形模拟、模具设计、成形控制等技术进行了详细的论述;最后结合典型钣金件制造工艺说明了上述技术的集成应用案例。

本书可作为航空航天高等院校航空宇航制造工程专业教材,也可供从事钣金件制造技术研究人员、工程技术人员和研究生在科研、生产中参考。

图书在版编目(CIP)数据

钣金件数字化制造技术 / 王俊彪等著. —北京:
国防工业出版社, 2015. 8
ISBN 978-7-118-10162-1

I. ①钣... II. ①王... III. ①钣金件-计算机辅助制
造 IV. ①TG38-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 159489 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 22 $\frac{3}{4}$ 字数 560 千字
2015 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 69.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

数字化是现代制造技术发展的核心,数字化设计制造技术在学术界、工程界受到普遍重视。飞机作为高技术复杂度的产品,在数字化设计制造技术的发展和應用方面走在前列。数字化定义、数字化预装配、数字样机、基于模型的定义等技术引发了飞机设计技术的重大变革。但与此同时,工程界必须要面对一个新的挑战,即:如何让数字化设计的成果既“好看”又“好用”;如何让制造也能完全适应数字化趋势而协调发展,实现制造的全面变革。

飞机金属材料零件制造工艺主要包括机加和钣金两大类。当数控加工中心及以其为主体构建的先进制造技术取得巨大成就并且在生产实际中有了广泛深入的基础时,飞机制造似乎只是一个机加问题。但是,数控机床的大量引进是否就是飞机制造的全面变革?针对每类工艺发展数字化制造技术,必须源于其将材料转变为产品的技术特点。由于钣金工艺作为飞机制造的基础工艺,具有不可逆、应变硬化、变形与历史相关等塑性特性,迄今我们对钣金成形机理的掌握仍然十分有限。有人说机加技术是“加减法”,钣金成形技术是“微积分”,这在一定程度上反映了钣金成形问题的特殊性。如果不重视占飞机机体结构零件数50%的钣金件的制造,“飞机制造的数字化”只能是一句空话。飞机制造的数字化离不开钣金的数字化,这一认识同时也得到了业界、同行、前辈的认同。

2003年8月,在航空工艺技术交流会上,作者交流了论文《钣金数字化制造技术的研究和应用》,介绍了钣金数字化制造系统的概念和基本体系,得到了与会同仁的认同。2003年,西北工业大学与江西洪都航空有限责任公司(以下简称中航工业洪都公司)共同申报了钣金数字化制造系统技术项目,2004年正式批准立项,从而开始了对钣金件数字化制造技术的研究、开发和应用。事实上,钣金数字化制造系统复杂而庞大,系统内所涉及的各种成形方法、数量各具“个性”,钣金数字化制造所涉及的关键技术也非常多。在此研究基础上,从2006年至2013年,作为技术支持单位的项目团队与中航工业洪都公司又连续承研了钣金件数字化制造集成技术、钣金件数字化制造数据库工程技术研究,从钣金件数字化制造系统方案设计到壁板数字化展开等单项技术开发、从以钣金工艺数据库为核心制造集成体系构建到钣金件数字化制造数据库工程技术的推广应用,逐步丰富和发展了钣金件数字化制造的理论和技术,各单项技术已在型号研制中发挥了重要作用,成效显著。时至今日,钣金件数字化制造技术成果已逐步在工程中得到全面应用。

本书根据作者在钣金件制造技术研究多年积累的成果写成,分析了钣金件数字化制造的内涵和过程特性,刻画了钣金件数字化制造系统模型和运行特征,选取典型件和主要成形工艺,逐一介绍了钣金件制造全过程中所涉及的主要理论方法和多项关键技术,并简要分析了其未来的发展趋势。本书编写的目的就是系统地记录我国国防科技工业在钣金件数字化制造技

术方面的发展和进步。

多年来,作者的许多成果也是以前和现在的多位研究生付出辛勤劳动获得的,他们每个人都是这一成就的贡献者,同时钣金件数字化制造技术研究应用的经历,使他们具备了较高的综合素质、很强的科研能力和发展国防科技的责任意识,毕业后都到航空、航天领域的研究所、制造厂工作,继续投身国防科技工业发展。

王俊彪

2014年11月

钣金件构成飞机机体的框架和气动外形,结构复杂、尺寸和选材各异,品种繁多、批量小、制造要求高,其结构和生产特点决定了其制造技术特性。新材料、复杂结构钣金件的制造往往是新型号飞机研制和生产中需要突破的关键瓶颈技术之一。钣金件制造中的许多难题来源于钣金件成形的本质特性,即利用金属材料在固体状态下的塑性,通过模具及外力作用改变工件的形状和尺寸,这一过程非线性、不可逆。数字化是现代制造技术发展的核心所在,钣金件制造技术发展也不例外。要发展高效、高精度的钣金件制造技术,就要根据钣金件制造的技术特性准确地定位钣金件数字化制造技术的关键,为钣金件数字化制造理论方法研究和技术开发提供指导,进而逐一突破典型钣金件、典型成形工艺的关键制造技术。

本书对钣金件数字化制造的内涵进行了阐释,对钣金件数字化制造系统的运行模式进行了定位,深入探讨了钣金件数字化制造的方法和各项关键技术。本书结构大致可分为四个部分:

第一部分(第1章~第3章),论述了钣金件数字化制造的内涵、过程特性和系统模型与运行模式。第1章为概述,介绍钣金件及成形工艺特点,讨论以数字化为核心的钣金件制造技术发展和钣金件数字化制造的内涵、科学问题与技术组成。第2章分析了钣金件制造过程的特性,包括成形过程的非线性、成形工艺的多谱性、工序件信息的多态性和制造的知识密集性。第3章讨论了钣金件数字化制造系统模型与运行模式,建立了钣金件制造系统模型和运行模式,用于指导整体钣金件数字化制造技术体系的发展。

第二部分(第4章~第5章)论述了钣金件数字化制造运行模式的两个方面,为整个钣金件数字化制造的关键技术发展奠定基础。第4章讨论了钣金件制造模型及其数字化定义,提出了制造模型的组织、定义过程及典型件制造模型定义方法,为作为制造数据源的数字量定义技术发展提供指导。第5章讨论了钣金件制造工艺领域知识重用方法,提出了知识重用方法模型及相应的知识建模和使用方法,为钣金件智能化工程技术发展提供指导。

第三部分(第6章~第14章)论述了钣金件数字化制造的专项技术,包括展开、回弹补偿、数值模拟、成形性评估、工艺过程设计、成形模具设计、数字化检测,覆盖了钣金件制造过程的各个方面,分别结合技术问题的分析提出了解决方案,结合典型件和成形工艺给出了实例。第6章讨论了钣金件成形过程数值模拟技术,分别介绍了拉弯、橡皮囊液压成形、喷丸成形和时效成形的数值模拟技术。第7章讨论了钣金件数字化展开算法与技术,分析了展开问题,提出了曲面优化展开算法,介绍了整体壁板和框肋两类典型件数字化展开技术。第8章讨论了典型钣金件成形回弹补偿技术,综述了几类典型的回弹补偿方法,重点论述了已经过工程验证的型材零件、框肋零件和蒙皮零件的回弹补偿方法。第9章讨论了钣金件成形性评估技术,介

介绍了成形性评估的内容、作用、模型和三种不同的方法,重点介绍了基于知识的钣金件单参数评估技术。第10章讨论了钣金件工艺过程智能化设计技术,介绍了钣金件工艺过程及设计原理,论述了全局工艺过程智能化设计方法和局部工艺过程的工艺参数计算方法。第11章讨论了钣金件成形模具数字化设计技术,介绍了钣金成形模具结构、设计特点及控形依据转变过程,具体论述了橡皮囊液压成形模具、型材拉弯成形模具和导管弯曲成形模具的设计技术。第12章讨论了钣金件数字化检测技术,分别介绍了钣金件制造模型检测和成形后工件数字化检测技术。第13章讨论了钣金件成形设备控制技术,以型材数字化拉弯设备控制对象简要介绍了数控系统、自适应控制、实时控制和集成控制的技术。第14章讨论了典型钣金件数字化制造应用案例。

第四部分(第15章)简单讨论了钣金件数字化制造技术发展,对具体发展方向提出作者的思路。

本书由王俊彪、刘闯、王永军、张贤杰编著,王俊彪任主编,刘闯任副主编。其中,第1章、第2章、第4章、第9章、第10章、第11章、第12章由王俊彪和刘闯编写,第3章由王俊彪、刘闯、张贤杰、王永军编写,第5章由刘闯编写,第6章由王永军、王俊彪、张贤杰编写,第7章由张贤杰、刘闯编写,第8章、第14章由王永军、刘闯、张贤杰编写,第13章由王永军编写,第15章由王俊彪编写。

钣金件制造是一个充满魅力的技术领域,它既有悠久的发展历史供人们去追溯和回味,也留下了许多研究课题作为后来研究者们去探索和攻关。本书介绍的内容仅是以数字化为核心的钣金件制造技术方面的一些成果,而数字化制造技术本身是一门还在发展的综合性交叉学科。本书的涉及面广,技术难度较大,有些技术还处在发展和完善的过程中,加上作者水平和经验所限,书中谬误之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作者

2014年11月

致谢

本书在钣金件数字化制造技术方面从基础理论、关键技术攻关到工程化开发的研究工作,得到了国防基础科研钣金件数字化制造相关项目、国家 863 项目“复杂零件制造模型定义与优化”(编号:2007AA04Z139)、民机专项“大直径薄壁飞机导管数控弯曲成形技术研究”、国家自然科学基金项目“制造工艺知识领域变粒度重用方法研究”(批准号:51005185)、国家自然科学基金项目“制造模型及其状态生衍规律研究”(批准号:51275420)的资助,在此一并表示衷心的感谢!

钣金件数字化制造技术的发展,离不开国防基础科研项目的大力支持。国防科工局科技与质量司对本项技术的发展提出殷切的希望,并在项目论证、攻关和结题的各个环节多次给予关心指导,理清了发展脉络,在此表示衷心的感谢!

钣金件数字化制造技术的攻关,离不开与中航工业洪都公司、西飞公司、沈飞公司的项目组成员的密切合作。项目负责人在承担繁忙的管理工作的同时,对本项目组织技术攻关和协调;在洪都公司、西飞公司、沈飞公司制造工程部、钣金厂、模线所、工装所、信息工程部、喷丸厂等各相关部门的大力支持下,钣金件数字化制造各项技术才得以顺利开发和验证;培养的企业工程技术人员均已成为厂内的技术骨干或走向管理岗位。本书中没有将项目组成员的名字一一列出,在此,向项目组所有参研人员以及对项目研究和实施给予支持的各位朋友表示衷心的感谢!

钣金件数字化制造技术的成果,离不开作者所带团队多年来持之以恒的研究开发。项目组成员在承担繁重的教学工作同时,十几年如一日地奋战在科研一线,所指导的研究生亦任劳任怨地进行各项技术的研究、工程化开发和试验验证,逐年的技术积累使得钣金件数字化制造技术最终逐一得以突破,使得数字化真正深入到钣金制造,也使得飞机数字化制造技术更为完备。在此,一致表示谢意!

作者

2014 年 11 月

目录

第1章 概述	1
1.1 钣金零件及其特点	1
1.2 钣金件制造原理与工艺	5
1.2.1 钣金件制造过程	5
1.2.2 典型钣金件成形工艺	7
1.2.3 钣金件制造过程中几何信息的传递与控制	10
1.3 从模拟量向数字量传递的钣金件制造技术发展	11
1.3.1 以模拟量传递为特征的传统钣金件制造	11
1.3.2 以数字化为核心的钣金件制造技术发展	12
1.4 钣金件数字化制造的内涵、科学问题与技术组成	13
1.4.1 钣金件数字化制造的内涵及其科学问题	13
1.4.2 钣金件数字化制造技术的组成及其转变	14
第2章 钣金件制造过程的特性分析	17
2.1 钣金件成形过程的非线性	17
2.1.1 塑性成形过程应力应变关系的非线性	17
2.1.2 设计模型向工件模型映射的非线性	17
2.1.3 工艺参数对形状性能影响的非线性	18
2.2 钣金件成形工艺的多谱性	18
2.2.1 多种类型成形工艺的专用性	18
2.2.2 同一零件成形工艺的多样性	19
2.3 钣金工序件信息的多态性	21
2.3.1 面向工艺链的制造多状态特性	21
2.3.2 钣金件制造模型状态生衍特性	22
2.3.3 钣金件制造模型状态的近似性	23
2.3.4 钣金件制造模型数字量传递性	24
2.4 钣金件制造的知识密集性	25
2.4.1 钣金件制造知识描述的经验性	25
2.4.2 钣金件制造知识种类的多样性	26

2.4.3	钣金件制造知识构成的复杂性	26
2.4.4	钣金件制造知识数量的丰富性	27
2.4.5	钣金件制造知识内容的模糊性	27
2.4.6	钣金件制造知识应用的分形性	28
第3章	钣金件数字化制造系统模型与运行模式	30
3.1	钣金件数字化制造系统分析	30
3.1.1	钣金件数字化制造系统的概念	30
3.1.2	钣金件数字化制造系统的解析	31
3.1.3	钣金件数字化制造系统的性能	36
3.1.4	钣金件数字化制造系统局限性	37
3.2	钣金件数字化制造系统模型	38
3.2.1	钣金件数字化制造系统集成关系模型	38
3.2.2	钣金件数字化制造系统体系结构模型	39
3.2.3	钣金件数字化制造系统业务过程模型	41
3.3	钣金件数字化制造系统运行模式与特征	43
3.3.1	钣金件数字化制造系统运行模式	43
3.3.2	钣金件数字化制造系统运行特征	46
第4章	钣金件制造模型及其数字化定义方法	48
4.1	面向工艺链的钣金件制造模型	48
4.1.1	钣金件制造模型概述	48
4.1.2	钣金件制造模型组织	49
4.2	钣金件制造模型定义过程与方式	54
4.2.1	钣金件制造模型定义过程	54
4.2.2	钣金件制造模型生衍形式	54
4.2.3	钣金件制造模型定义方式	56
4.3	壁板件制造模型及其定义方法	57
4.3.1	壁板件制造模型	57
4.3.2	制造模型定义方法	65
4.4	框肋零件制造模型及其定义方法	68
4.4.1	框肋零件制造模型	68
4.4.2	制造模型定义方法	75
4.5	型材零件制造模型及其定义方法	80
4.5.1	型材零件制造模型	80
4.5.2	制造模型定义方法	81
第5章	钣金件制造工艺领域知识重用方法	83
5.1	钣金件制造工艺领域知识重用方法模型	83
5.1.1	钣金件制造问题求解分析	83

5.1.2	知识的概念及分析	85
5.1.3	知识重用方法模型	88
5.1.4	知识重用环境规划	91
5.2	钣金件制造工艺领域知识库构建方法	91
5.2.1	钣金件制造工艺领域知识结构模型	91
5.2.2	钣金件制造知识库构建原则与管理方式	104
5.2.3	钣金件制造知识库构建具体过程	106
5.3	钣金件制造知识集成应用方法	113
5.3.1	钣金件制造知识集成应用问题解析	113
5.3.2	钣金件制造知识库集成方法	115
5.3.3	钣金件制造知识检索方法	120
5.4	钣金件数字化制造知识服务平台	125
5.4.1	平台的组成	125
5.4.2	平台实施应用	127
第6章	钣金件成形过程数值模拟方法	130
6.1	成形过程数值模拟概述	130
6.1.1	成形过程模拟的作用	130
6.1.2	成形过程模拟的方法	131
6.1.3	有限元法的基本算法模型	132
6.2	拉弯成形过程模拟方法	134
6.2.1	拉弯成形数值模拟主要步骤	134
6.2.2	拉弯成形有限元模型建模方法	135
6.2.3	拉弯成形及回弹模拟方法	138
6.2.4	典型实例分析	141
6.3	橡皮囊液压成形过程模拟方法	145
6.3.1	橡皮囊液压成形有限元模型建模方法	146
6.3.2	橡皮囊液压成形数值模拟结果分析	149
6.4	喷丸成形与强化过程模拟方法	153
6.4.1	有限元模型建模方法	154
6.4.2	模拟结果分析	156
6.4.3	应用实例	157
6.5	时效应力松弛成形过程模拟方法	159
6.5.1	有限元模型建模方法	159
6.5.2	有限元计算结果分析	160
6.5.3	整体壁板时效应力松弛成形的有限元模拟	162
第7章	钣金件数字化展开算法与技术	165
7.1	钣金件展开问题及复杂性分析	165
7.1.1	钣金件展开问题的定义	165

7.1.2	展开问题的复杂性分析	166
7.2	钣金件曲面展开算法	168
7.2.1	展开算法综述	168
7.2.2	曲面可展性分析	169
7.2.3	展开精度的评价	173
7.2.4	复杂曲面数字化展开方法	174
7.3	整体壁板数字化展开建模技术	182
7.3.1	整体壁板数字化展开建模原理	182
7.3.2	整体壁板数字化展开建模流程	184
7.3.3	整体壁板板坯建模技术	186
7.4	框肋零件数字化展开技术	189
7.4.1	框肋零件展开方法	189
7.4.2	不同展开方法计算结果精度比较	193
第8章	典型钣金件成形回弹补偿技术	199
8.1	典型钣金件回弹问题及方法	199
8.1.1	典型钣金件回弹问题分析	199
8.1.2	典型钣金件回弹补偿方法	200
8.2	型材拉弯成形回弹预测与补偿技术	200
8.2.1	型材零件拉弯回弹量的表达	200
8.2.2	型材零件拉弯回弹量预测方法	201
8.2.3	型材拉弯零件回弹量的补偿	203
8.3	框肋零件弯边回弹预测与补偿技术	204
8.3.1	框肋零件工艺模型参考模型的构建方法	204
8.3.2	框肋零件弯边离散模型的构建方法	206
8.3.3	变截面凸曲线弯边回弹补偿计算方法	208
8.3.4	回弹补偿工艺模型的构建	210
8.4	蒙皮零件回弹预测与补偿技术	212
8.4.1	蒙皮零件曲面回弹修正方法概述	212
8.4.2	法线计算方法	213
8.4.3	回弹距离计算	221
8.4.4	回弹补偿计算	224
8.4.5	算例	227
第9章	钣金件成形性评估技术	230
9.1	钣金件成形性评估概述	230
9.1.1	钣金件成形性概念分析	230
9.1.2	成形性评估的作用分析	234
9.2	钣金件成形性评估模型	238
9.2.1	成形性评估内容模型	238

9.2.2	成形性评估问题模型	239
9.2.3	成形性评估过程模型	239
9.3	钣金件成形性数字化评估方法	240
9.3.1	基于知识的典型零件单参数成形性评估	240
9.3.2	基于数值模拟和成形极限图的成形性评估	242
9.3.3	基于神经网络的复杂工艺多参数综合评估	245
9.4	基于知识的钣金件成形性数字化评估技术	246
9.4.1	钣金件成形性评估系统功能要求	246
9.4.2	钣金件成形性评估系统运行流程	247
9.4.3	基于知识的钣金件成形性单参数评估实例	248
第 10 章	钣金件工艺过程智能化设计技术	251
10.1	钣金件工艺过程及设计基本原理	251
10.1.1	工艺过程组成与设计逻辑	251
10.1.2	工艺过程智能化设计方法	253
10.1.3	钣金件工艺过程智能设计方式	255
10.2	钣金件全局工艺流程智能化设计技术	256
10.2.1	钣金件工艺流程智能设计概述	256
10.2.2	钣金件信息综合分类编码方法	257
10.2.3	钣金件工艺流程设计知识库	258
10.2.4	基于知识的工艺流程智能化设计过程	265
10.3	钣金件制造工艺参数智能化设计技术	269
10.3.1	基于经验公式(数据)的工艺参数设计技术	269
10.3.2	基于 ANN 的整体壁板喷丸成形工艺参数智能设计技术	271
10.3.3	基于实例的框肋零件弯边回弹补偿参数智能化预测技术	275
第 11 章	钣金件成形模具数字化设计技术	278
11.1	钣金件成形模具结构及设计内容	278
11.1.1	钣金件成形模具结构特点及分析	278
11.1.2	钣金件成形模具设计内容及特点	279
11.2	钣金件从设计模型到成形模具的数据传递方式	280
11.2.1	产品信息模拟量传递的钣金件成形模具制造	280
11.2.2	设计模型数字量传递的钣金件成形模具设计	282
11.2.3	制造模型数字量传递的钣金件成形模具设计	283
11.3	钣金件成形模具数字化设计方式	283
11.3.1	钣金件成形模具设计要考虑的问题	283
11.3.2	钣金件成形模具数字化设计方式	284
11.4	典型钣金件成形模具数字化设计技术	285
11.4.1	橡皮囊液压成形模具数字化设计技术	286
11.4.2	型材拉弯成形模具设计技术	291

11.4.3	导管数控弯曲成形模具数字化设计技术	293
第 12 章	钣金件数字化检测技术	298
12.1	钣金件检测内容	298
12.1.1	框肋零件检测	298
12.1.2	挤压型材零件检测	299
12.1.3	蒙皮与壁板零件检测	299
12.2	整体壁板板坯模型检测方法	301
12.2.1	板坯基体检测	301
12.2.2	长桁检测	304
12.3	钣金成形零件数字化检测方法	309
12.3.1	数字化检测方法及其适用性分析	309
12.3.2	钣金件数字化检测设备与流程	310
12.3.3	钣金件三维扫描测量方法	311
12.3.4	三维扫描数据与设计模型比对评判方法	314
第 13 章	钣金件成形设备控制技术	319
13.1	钣金件数控成形设备的基础作用	319
13.2	钣金件成形设备控制的特点	320
13.3	基于上下位机结构的拉弯机硬件控制系统	321
13.3.1	上位机	322
13.3.2	下位机	322
13.4	模块式拉弯机数控软件系统	323
13.4.1	数控拉弯机 NC 指令体系	327
13.4.2	拉弯成形自动编程及程序示例	329
13.4.3	拉弯成形过程仿真	330
13.5	拉弯机 PID 控制技术	331
第 14 章	典型钣金件数字化制造应用案例	335
14.1	钣金平板件数字化下料应用案例	335
14.2	整体壁板数控喷丸成形数字化制造应用案例	337
14.3	框肋零件橡皮囊液压成形数字化制造应用案例	338
14.4	型材数控拉弯成形数字化制造应用案例	340
14.5	导管数控弯曲成形数字化制造应用案例	342
第 15 章	钣金件数字化制造技术发展展望	344
参考文献		346

钣金零件包括薄板、薄壁型材和薄壁管材金属零件,是飞机的主要结构件,钣金件制造技术是飞机制造的关键技术之一。本章介绍了钣金零件及其制造工艺,分析了从以模拟量传递为特征到以数字化为核心的钣金件制造技术发展需求,论述了钣金件数字化制造的内涵、科学问题、技术组成。

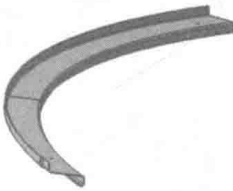
1.1 钣金零件及其特点

钣金零件简称钣金件,是采用以塑性成形为基础的成形工艺而得到的金属材料零件。钣金件具有零件品种多、材料种类多、成形工艺方法多等特点,随着现代飞机技战术指标的不断提高和飞机结构不断改进,钣金件结构日益复杂,新型材料不断应用,制造周期和质量要求也不断提高。

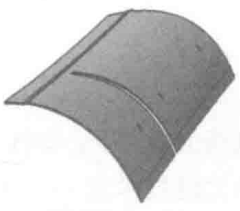
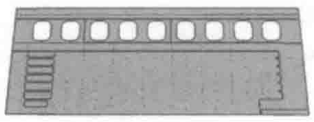
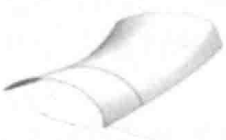
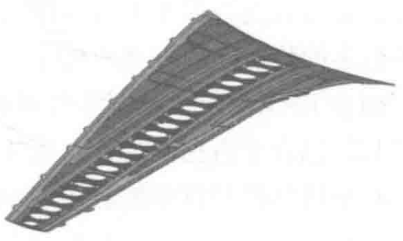
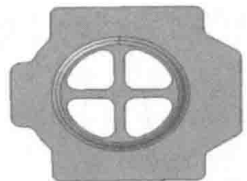
1. 零件种类多、所用材料多、品种项数多

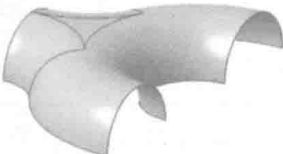
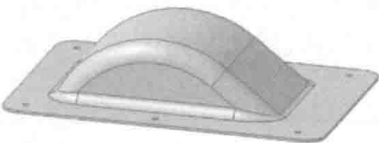
近代飞机机体依然是钣金铆接结构,主要由曲面外形的薄蒙皮,以及支撑蒙皮的纵、横轻骨架所组成,蒙皮和支撑骨架组合一体的整体壁板也得到应用。钣金件具有种类多、所用材料多、品种项数多的特点。根据飞机钣金零件特征多样性的特点,把零件按材料品种和功能特征进行分类,如表1-1所示。钣金零件材料包括铝及铝合金、镁合金、钛及钛合金、碳素钢、合金钢及不锈钢等,铝合金占比例最大。近年来,随着现代飞机技战术指标的不断提高,飞机结构不断改进,新型材料得到较多的应用,新型高强度铝合金、铝锂合金应用不断增加。

表1-1 飞机钣金件分类示例

一级分类	按功能分类	功能子类	图示
板材件	框肋零件	框	
		肋	

(续)

一级分类	按功能分类	功能子类	图 示
板材件	框肋零件	角材	
	蒙皮零件	机翼蒙皮	
		机身蒙皮	
		进气道蒙皮	
	整体壁板零件	机翼壁板	
	杂项零件	口盖	
		灯罩	

一级分类	按功能分类	功能子类	图 示
板材件	杂项零件	管叉零件	
		盒形件	
型材件	框缘		
	长桁		
	加强支柱		
	角片类连接件		
管材件	导管		

据统计,钣金件约占飞机零件数量的 50%,钣金件制造工艺装备约占飞机制造工艺装备的 65%,制造工作量约占 20%。三代机与二代机对比,钣金件总零件减少,但其数量比例并未减少(表 1-2)。