

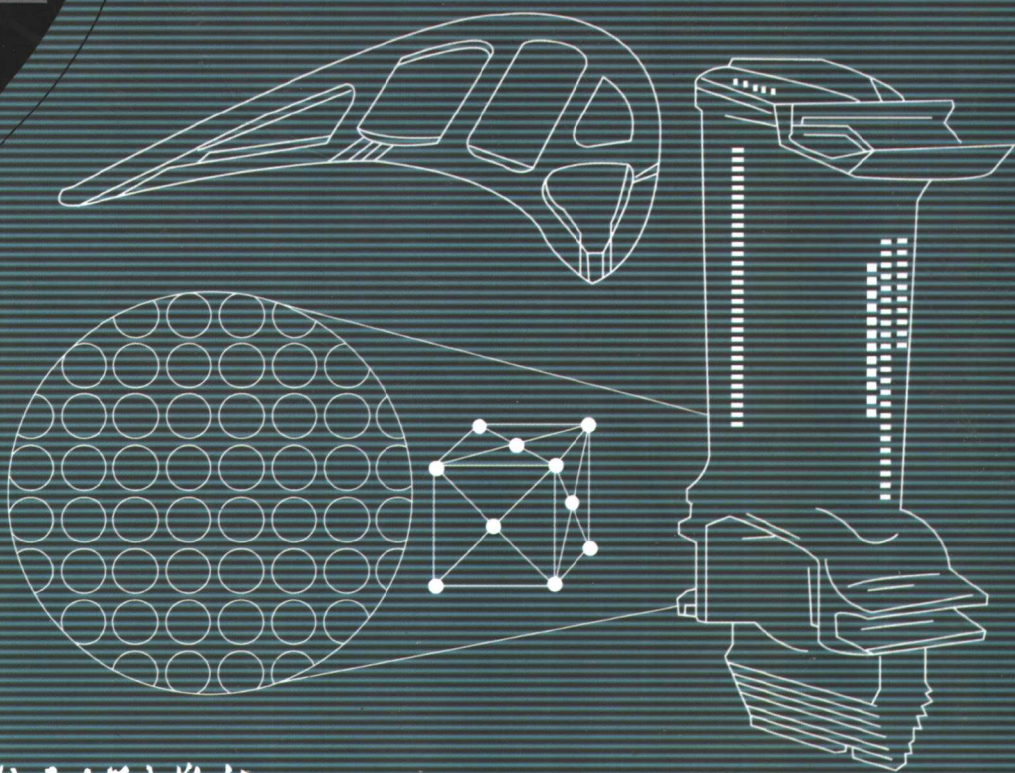
机械工程



国防科工委「十五」
规划教材

工程材料与成型技术

张彦华 编著



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·机械工程

工程材料与成型技术

张彦华 编著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书以工程材料与成型技术及其相互关系为核心编写。工程材料部分主要介绍国防武器装备常用的金属材料、高分子材料以及陶瓷材料与复合材料的结构、性能及其应用。成型技术部分以铸造成型、塑性成型、焊接与胶接及表面防护技术为主线,同时介绍成型质量、成型过程模拟及构件失效与修复等相关内容。

全书共分16章。第1章至第5章为材料科学基础;第6章介绍武器装备常用的金属材料;第7章至第10章分别介绍铸造、塑性成型及焊接等成型加工工艺;第11章为非金属与复合材料及成型工艺;第12章至第15章分别介绍工程材料的表面防护、成型质量与检测、成型工艺数值模拟技术和工程材料及构件的失效与修复等内容。第16章重点介绍工程材料与成型技术在装备制造中的应用。

本书可作为国防科技工业所属高等院校机械与制造工程类及相关专业本科生的教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料与成型技术/张彦华编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2005.3

ISBN 7-81077-567-7

I. 工… II. 张… III. ①工程材料②成型
IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 110244 号

工程材料与成型技术

张彦华 编著

责任编辑 刘晓明

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083)

发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

http://www.buaapress.com.cn E-mail:bhpress@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16

印张:25.5 字数:571千字

2005年3月第1版 2005年3月第1次印刷

印数:4 000册

ISBN 7-81077-567-7 定价:33.00元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯

乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春

杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禔

陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章

贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山

郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探



索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影 响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家、学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与技术、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业



走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

工程材料与成型技术是国防武器装备研制的关键之一。随着高新武器装备制造技术的不断发展,对工程材料与成型技术提出了更高的要求。本书是国防科工委重点教材建设计划教材,是根据《国防科工委所属高等学校教育事业“十五”计划和2010年规划》和《教育部关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革意见》的精神,参照有关机械工程类专业工程材料与成型技术教学的基本要求,结合国防武器装备制造的特点及发展趋势,为国防科技工业培养适应21世纪需要的高等机械与制造工程技术人才而编写的。

本书编写的指导思想是以突出国防武器装备制造对工程材料与成型技术的特殊需求为特色,着重介绍航空、航天、兵器和船舶等重点国防装备工程材料与成型技术基础理论及应用;以培养国防科技工业生产第一线需要的高等工程技术人才为目标,将工程材料与成型技术作为国防院校机械工程类专业教学的重要内容;充分重视新材料与成型新技术的发展,将工程材料与成型技术同国防武器装备结构特点及制造紧密结合。

全书以工程材料与成型技术及其相互关系为核心编写。工程材料部分主要介绍国防武器装备常用的金属材料、高分子材料、陶瓷材料与复合材料。成型技术部分以铸造成型、塑性成型、焊接与胶接及表面防护技术为主线,同时介绍成型质量、成型过程模拟及构件失效与修复等相关内容。

本书共分16章。第1章为工程材料基础,主要介绍金属材料与非金属材料的结构。第2章介绍工程材料的力学性能、物理性能和化学性能。第3章至第5章分别介绍金属材料的结晶与相变、金属材料的热处理及金属材料的塑性变形与再结晶,此内容是金属材料成型加工的冶金基础。第6章介绍武器装备制造常用的金属材料。第7章至第9章分别介绍铸造成型、塑性成型和焊接等成型加工工艺。第10章简要介绍了快速成型、半固态成型、粉末冶金成型、超塑成型、定向凝固技术与微成型等新技术。第11章为非金属与复合材料及成型工艺,分别介绍高分子材料、陶瓷材料与复合材料及成型技术。第12章介绍工程材料的表面防护,包括热喷涂与堆焊、气相沉积技术及高能束表面改性技术等。第13章介绍

工程材料成型质量与检验,包括成型缺陷分析、质量检验和检测技术等。第14章介绍成型工艺数值模拟技术。第15章介绍工程材料及构件的失效分析、构件的完整性评定和构件的损伤与修复。第16章重点介绍工程材料与成型技术在国防武器装备制造中的应用。

编写具有国防特色的教材对于培养国防科技工业所需的高层次人才具有重要意义,在我国高等学校教材编写方面是一项新的尝试。由于编者对武器装备应用的工程材料及成型技术掌握得不够全面,相关知识领域和水平有限,对书中的疏漏和不当,敬请读者批评指正。

作者

2004年3月

目 录

绪 论

0.1 工程材料及成型工艺在装备研制中的作用	1
0.2 工程材料与成型技术的发展	4
0.3 本课程的教学要求	7

第 1 章 工程材料的结构

1.1 材料粒子的键合方式	8
1.2 金属的晶体结构	10
1.3 高聚合物的结构	20
1.4 陶瓷的结构	22
1.5 复合材料的结构	24
1.6 材料的同素异构与同分异构	25
1.7 纳米材料的结构	27
思考题	29

第 2 章 工程材料的性能

2.1 工程材料的力学性能	30
2.2 工程材料的物理性能	46
2.3 工程材料的化学性能	52
2.4 工程材料的工艺性能	54
思考题	55

第 3 章 金属材料的结晶与相变

3.1 纯金属的结晶	56
3.2 合金的凝固	59
3.3 铁碳合金平衡态的相变	69
3.4 钢在加热和冷却时的组织转变	75
3.5 金属焊接时的结晶与相变	83
思考题	88

第 4 章 金属材料的热处理

4.1 退火与正火	90
4.2 淬火与回火	94
4.3 金属材料的表面热处理	100
4.4 固溶热处理与时效强化	107



4.5 先进热处理技术	107
思考题	110
第5章 金属的塑性变形与再结晶	
5.1 金属的塑性变形	111
5.2 塑性变形对金属组织和性能的影响	115
5.3 冷变形金属的回复与再结晶	118
5.4 金属的热塑性变形	121
思考题	126
第6章 金属材料	
6.1 合金结构钢	127
6.2 不锈钢	130
6.3 高温合金	133
6.4 有色金属	134
6.5 特殊性能合金	139
思考题	146
第7章 铸造成型技术	
7.1 液态金属凝固成型的基本原理	147
7.2 砂型铸造	151
7.3 金属型铸造	154
7.4 熔模铸造	158
7.5 压力铸造	163
7.6 低压铸造与离心铸造	167
7.7 铸造工艺设计	170
思考题	174
第8章 塑性成型技术	
8.1 金属塑性成型性能	175
8.2 锻造成型	178
8.3 板料成形工艺	192
8.4 旋压成型	201
8.5 挤压、轧制、拉拔成型	204
8.6 高能率成型	206
思考题	209
第9章 焊接与胶接	
9.1 焊接热效应	210
9.2 焊接方法	215
9.3 金属材料的焊接	227
9.4 焊接结构制造	229



9.5 胶 接	237
思考题	245
第 10 章 成型加工新技术	
10.1 快速成型技术	246
10.2 半固态成型技术	248
10.3 粉末冶金成型	252
10.4 超塑成型	258
10.5 定向凝固技术	263
10.6 微成型加工技术	266
思考题	273
第 11 章 非金属与复合材料及成型工艺	
11.1 高分子材料及成型工艺	274
11.2 陶瓷材料及成型工艺	281
11.3 复合材料及成型工艺	284
思考题	293
第 12 章 工程材料的表面防护	
12.1 装备结构材料表面性能要求与防护	294
12.2 热喷涂	297
12.3 堆 焊	303
12.4 气相沉积技术	307
12.5 高能束表面改性技术	312
12.6 金属表面形变强化	316
思考题	318
第 13 章 成型质量与检验	
13.1 成型质量与检验概述	319
13.2 铸造成型缺陷	324
13.3 塑性成型缺陷	327
13.4 焊接缺陷	329
13.5 成型质量检验过程	332
思考题	335
第 14 章 材料成型工艺数值模拟技术	
14.1 概 述	336
14.2 铸造凝固过程数值模拟	339
14.3 塑性成型数值模拟技术	342
14.4 焊接过程数值模拟技术	349
思考题	353



第 15 章 工程材料及构件的失效与修复

15.1 工程材料的失效形式	354
15.2 失效原因与失效分析	357
15.3 结构的完整性与工程风险	362
15.4 修复与再制造技术	366
思考题	373

第 16 章 工程材料与成型技术在装备制造中的应用

16.1 装备结构与材料及成型技术	374
16.2 装备工程材料的发展与应用	377
16.3 装备制造中的成型工艺	385
思考题	392

参考文献

绪 论

0.1 工程材料及成型工艺在装备研制中的作用

1. 工程材料是装备研制的基础

现代战争使人们认识到一个国家的国防实力在很大程度上依赖于能否研制出高性能的武器装备,没有高性能装备的军队就很难在未来战争中占据主动。高性能的装备需要先进的工程材料,而先进的工程材料也总是优先用于军事装备,然后再向民用转移,从而不断推动工程材料的发展。

先进工程材料是新一代武器装备的物质基础,也是当今世界军事领域的关键技术。金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料等结构材料在现代武器装备研制中处于重要地位;隐身材料、防护材料、致密能源材料以及信息智能材料等功能材料成为发展先进武器装备的关键。近年来,还出现了结构材料功能化和功能材料结构化的趋势,并形成兼有多种功能的多功能材料。

国防工业消耗的工程材料量并不大,但是其价值非常之高。例如,飞机与发动机所用材料需考虑寿命周期成本、强度质量比、疲劳寿命、断裂韧性和生存力等因素,以保证装备的可靠性、安全性与结构完整性。航天飞行器用材需要考虑比刚度和比强度、低的热膨胀系数及在空间环境中的耐久性。研制先进的亚声速飞机、超声速飞机和穿越大气层飞机需要使用高强度结构和耐热超轻型结构,开发和利用新型合金、金属间化合物、先进非金属材料及复合材料成为必然。研制隐身飞机与坦克等装备更需要发展与应用新材料。因此,先进工程材料的发展与应用水平在保证装备技术优势方面发挥着重要作用。

工程材料的选用是装备研制过程的重要组成部分,选材对研制过程具有较大影响。新型号装备的设计阶段就必须根据装备的性能要求,按照各零部件、系统与结构的工作环境要求,确定所选用的材料,这就需要开展材料科研与之相互配合,经全面试验论证与综合分析后才能确定材料。大量的接近使用条件下的材料应用性科研常常会贯穿于整个型号研制过程中。装备定型生产后还必须根据技术的发展与实际需要不断进行改进与维修,同样有材料的选用问题。因此,工程材料的选用是一项理论与实践紧密结合的工程技术工作,对于推动先进武器装备的研制进程是不能忽视的。

2. 成型工艺是装备研制的关键

任何装备都是由多种形状的零部件组成的,成型工艺就是根据设计的要求将工程材料加



工成具有一定形状和尺寸的零部件的过程。成型加工不仅赋予零件的形状,而且控制着零件的最终使用特性。零部件的材料结构与性能是成型加工的结果,与成型加工前的材料结构及性能不同,最终成型后的零部件或结构必须保证装备在规定的寿命期间完成特定的任务,即所谓的使用性能。例如,现代航空发动机(见图 0-1)许多零部件在选用高性能材料的同时,还要采用先进的成型加工技术最终保证零部件的尺寸精度和性能。

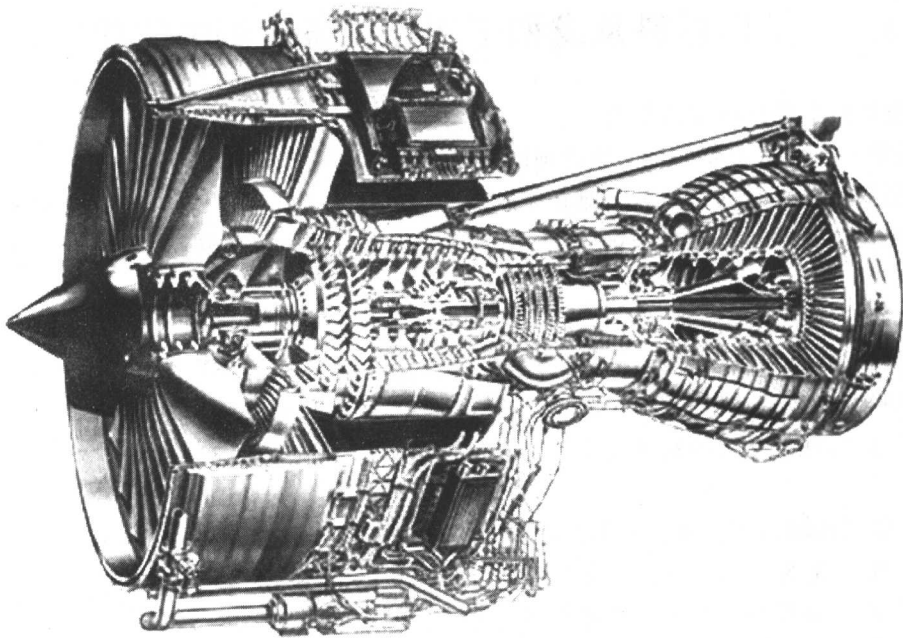


图 0-1 航空发动机

图 0-2 为成型加工、使用性能、材料性质和成分/组织四个因素之间的相互关系。四个因素中任一因素发生变化就会引起其他因素发生变化。对同一材料,用不同成型工艺制造的构件,其性能将有较大的差异。成型技术研究就是掌握这些因素之间的相互联系,制造符合要求的产品。

成型加工不但赋予材料形状,同时也是使材料增值的经济活动。商用飞机的成本与同等质量银的价值相当,而航天飞机的成本则与同等质量金的价值相当。我国在高端民用产品制造方面竞争力不足的原因之一就是成型加工等先进制造工艺技术薄弱,国防装备的研制方面也存在同样的问题。尽管不同的装备所采用的成型加工技术有很大的不同,但在成型加工和制造方面提高技术能力和效率上的要求是一致的。为了高效、低成本地研制高性能装备,必须提高成型加工制造能力,不断发展并采用先进成型技术。

成型加工是装备研制的关键技术之一。高性能的航空发动机研制集中体现了成型加工的

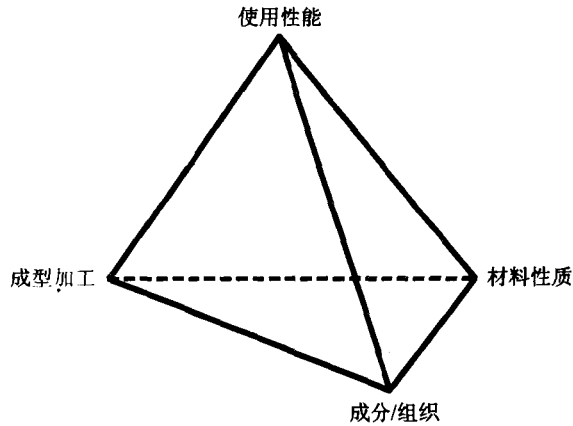


图 0-2 成型加工、使用性能、材料性质和成分/组织之间的关系

重要作用,只有高度重视发展先进成型技术才能把各种复杂的零部件制造出来,才能确保发动机的先进性。

飞机的气动外形要通过材料成型来实现。机体承力构件对飞机外形与飞行性能的保证具有重要意义。图 0-3 为飞机结构的工艺分解。由此可见,整架飞机是由各种形状的具有特定功能的成型件与结构组成的。

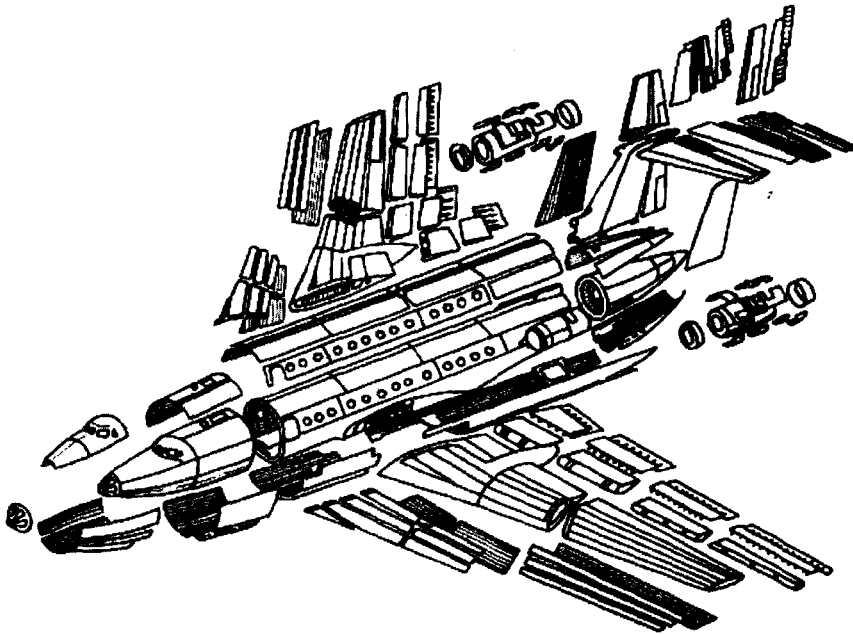


图 0-3 飞机结构的工艺分解



装备性能的实现依赖于先进的成型技术。根据国防科技工业的特点,武器装备预研中应加强材料成型物理模拟与数值模拟研究,通过成型加工过程模拟掌握材料成型规律,降低实验成本,为装备研制提供科学依据。

0.2 工程材料与成型技术的发展

1. 先进工程材料及应用

新材料技术在军事上的用途十分广泛,用于武器装备可使其升级换代,性能大大提高。目前,世界范围内的军用新材料技术已有上万种,并以每年5%的速率递增,正向高功能化、超高性能化、复合轻量和智能化的方向发展。

(1) 结构材料

结构材料在武器装备零部件及结构制造中占主导地位。现代飞机集中反映了先进结构材料的发展。图0-4为结构材料在F-22战斗机上的应用情况。

导弹弹体和卫星都要使用质量轻、刚度好、耐高温及弹性强的新型复合材料。美国将火箭发动机金属壳体改用石墨纤维复合材料后其质量减轻了38 000 kg;而用碳铝复合材料制造卫星的波导管,不仅满足了轴向刚度、低膨胀系数和导电性能等方面的要求,而且使质量减轻了30%。

将高密度钨合金与贫铀材料用于破甲弹制造,可以提高穿甲侵彻力。破甲弹使用了新材料技术后,其侵彻深度已大于锥形炮弹的10倍,一些大口径的射流侵彻深度已经达到1 300 mm。破甲弹材料技术进一步向高纯度冶炼、新合金、精密成型和高性能复合化方向发展。

发展轻型结构材料对火炮的机动性也具有决定意义。许多国家都在利用高技术材料研制超轻型远距离大威力火炮。轻型材料的使用,可以使火炮的体积更小、质量更轻、机动性能更好、弹丸速度更快和威力更大。

面对种种现代反装甲技术的发展,以及未来战场对坦克和装甲车辆构成的全方位威胁,迫切需要进一步提高现代复合装甲的防护能力。这就需要进一步开发具有超高硬度、高韧性和良好焊接性能的装甲钢、高强度先进陶瓷和高性能聚合物材料等新一代特殊功能材料。要使坦克不被击中,除提高机动性能外,更重要的是要发展“主动装甲”,即能预先识别目标,并利用诱饵触发和物理摧毁方法,破坏来袭兵器的装甲。这种“主动装甲”实际上是在复合装甲中由引入的敏感、传感及微电子等材料和技术而构成的多功能材料系统。

先进高温结构陶瓷具有很强的韧性、可塑性、耐磨性和抗冲击能力,与普通热燃气轮机相比,陶瓷热机的质量可减轻30%,而功率则提高30%,节约燃料50%。

高分子材料除在武器装备中大量使用外,还可以代替高强度合金用于军用飞机,可大大减轻其质量;同时,高分子材料也广泛用于粘接兵器部件,尤其是非金属比例较大的火箭和导弹