



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

工... 张... . 工程材料 成型  
.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](mailto: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:4000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 陈光禡

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

# 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
<b>第5章</b>	<b>金属的塑性变形与再结晶</b>	
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
<b>第6章</b>	<b>金属材料</b>	
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
<b>第7章</b>	<b>铸造成型技术</b>	
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
<b>第8章</b>	<b>塑性成型技术</b>	
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
<b>第9章</b>	<b>焊接与胶接</b>	
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
<b>第 10 章 成型加工新技术</b>	
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
<b>第 11 章 非金属与复合材料及成型工艺</b>	
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
<b>第 12 章 工程材料的表面防护</b>	
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
<b>第 13 章 成型质量与检验</b>	
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
<b>第 14 章 材料成型工艺数值模拟技术</b>	
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。

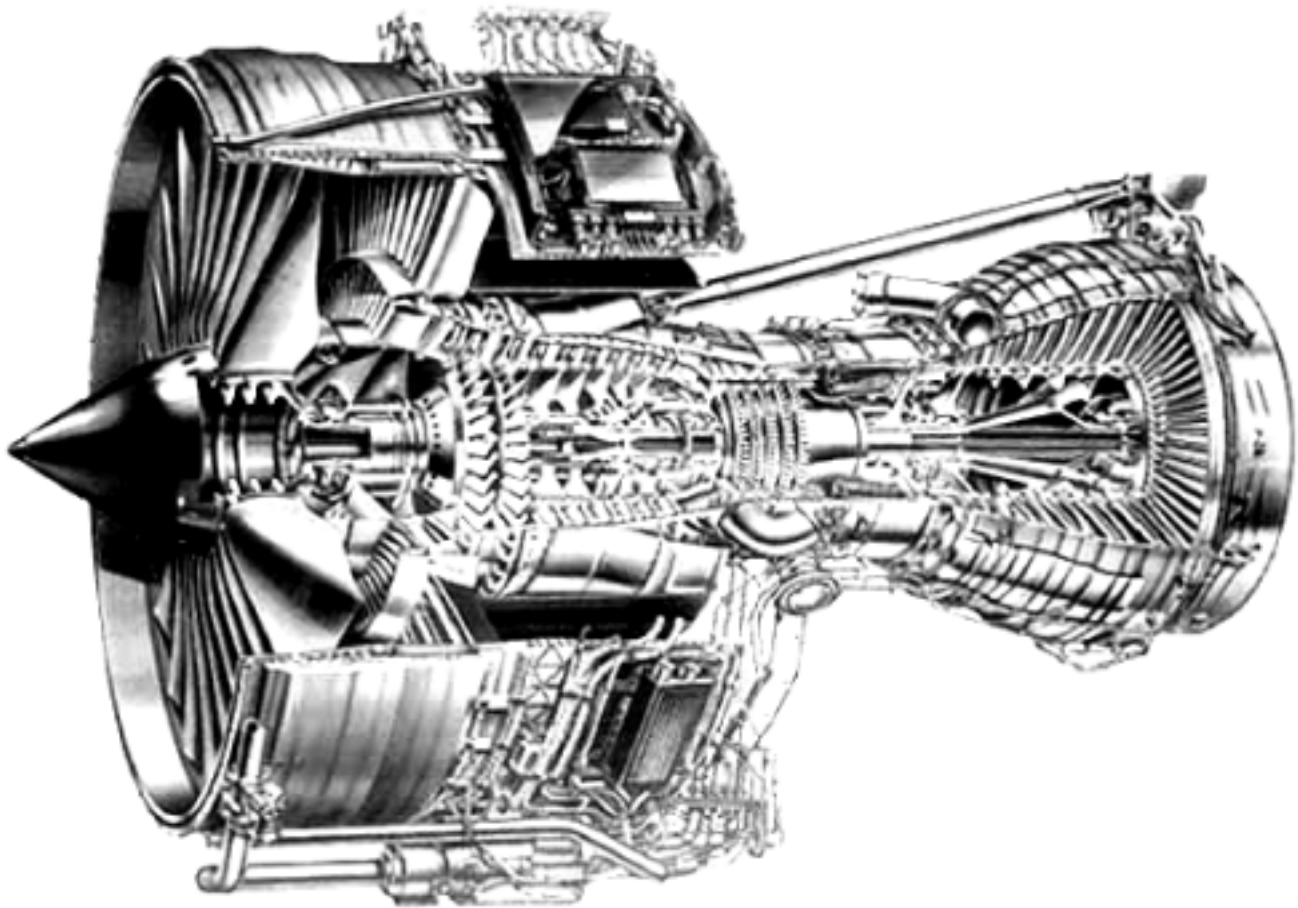


图 0-1 航空发动机

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

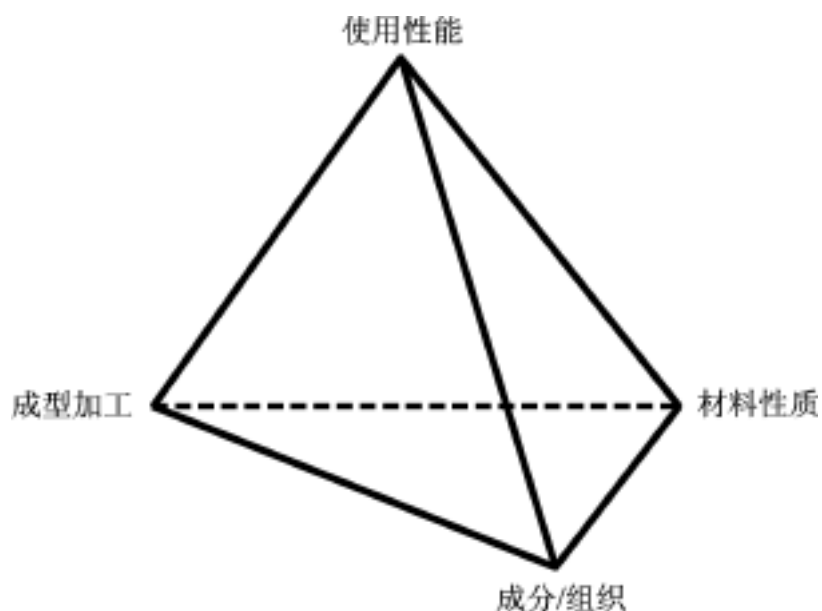


图 0-2 成型加工、使用性能、材料性质和成分/组织之间的关系

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。

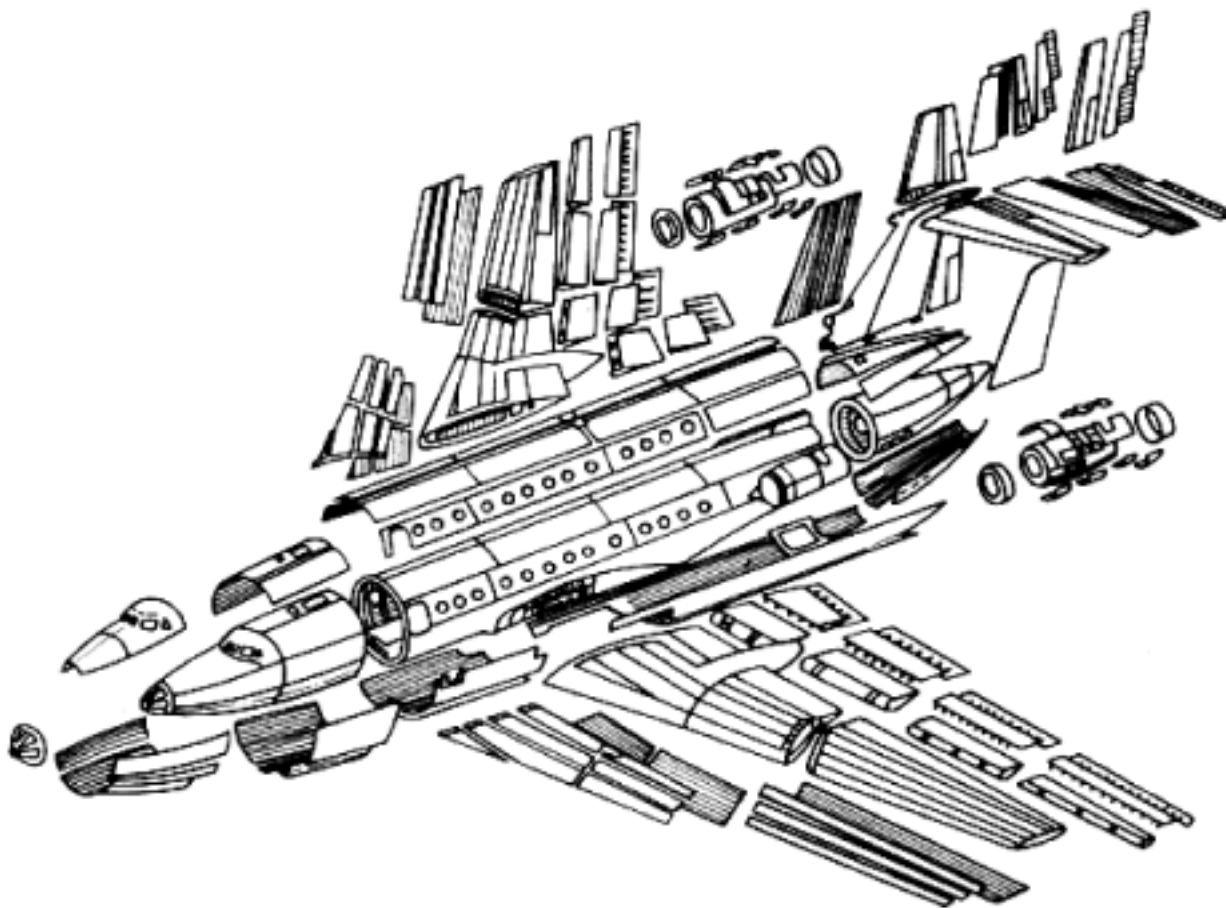


图 0-3 飞机结构的工艺分解



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

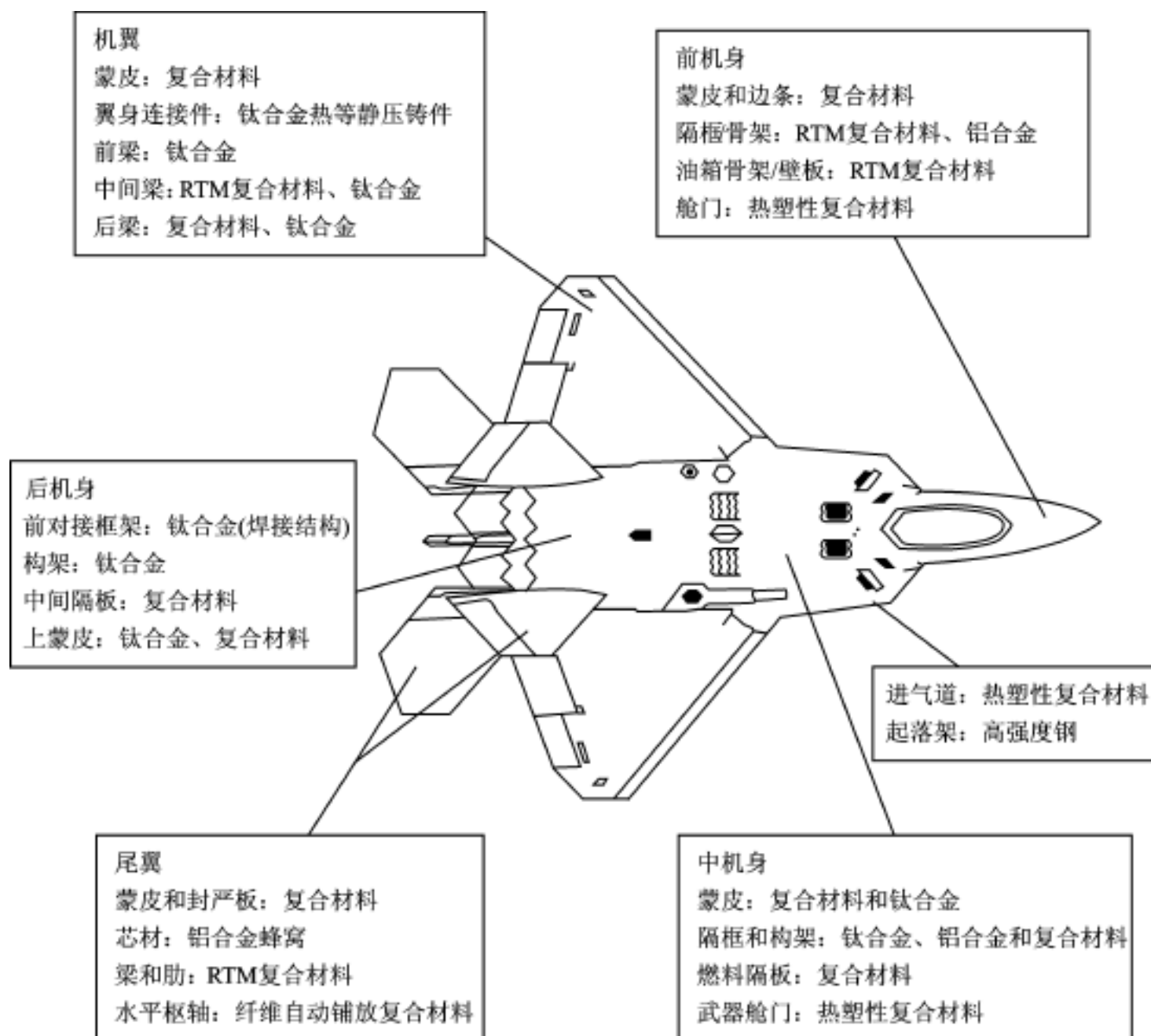


图 0-4 结构材料在 F—22 战斗机上的应用

部件。

复合材料是指两种以上不同性质或不同结构物质组合而成的材料,通常由基体材料和增强体构成。如碳纤维复合材料,具有强度高、刚度高、耐疲劳和质量轻等优点。采用纤维复合材料后,美国的 AV—8B 垂直起降飞机的质量减轻了 27%,F—18 战斗机的质量减轻了 10%。

## (2) 功能材料

功能材料是指可以利用声、光、电、磁、热、化及生化等效应,把能量从一种形式转变成另一种形式的材料。功能材料品种很多,如电子计算机的记忆元件、激光器的工作物质红宝石、声呐振荡器的压电陶瓷,以及超导材料、光学塑料、热电材料、光敏材料、反激光材料、防辐射与电子材料等。

现代隐形技术,除了外形设计上采用先进的方法,进行热红外线和自身电磁隐形外,主要



是使用新型吸收波材料,即在飞机表面涂覆能大量吸收雷达波的新型介质材料,将雷达电磁波吸收,使雷达无法发现。

功能材料在后勤装备中也得到广泛应用。20世纪80年代,美军开发的先进军用冬服材料,不仅比原冬服质量减少28%,保暖性提高20%,而且还可以使雨水进不来,人体蒸发的汗却能顺利地排出去。日本陆军研制的含有65%的芳族聚酰胺和35%的耐热处理棉纤维的混纺织物制成的新型迷彩作训服,在12s内能承受800℃高温,可大大减少战场烧伤的发生。

## 2. 先进成型技术的发展及应用

武器装备的设计、材料和制造技术三者相辅相成,互相促进,互相制约。新一代武器装备的研制总伴随着新材料、新结构和新工艺的重大突破。成型技术的发展,必将促进武器装备性能和结构的发展。

成型加工技术是先进制造技术的重要组成部分,是保证武器装备质量的基础技术。现代成型加工技术是集多种学科于一体的综合技术,是最能代表国家制造技术水平的重要方面。在现代武器装备研制中,材料成型技术的发展与应用主要表现在如下几方面:

新的成型工艺方法发展迅速,如单晶空心叶片精铸、粉末高温合金涡轮盘超塑性锻造、搅拌摩擦焊接、喷射沉积成型和隔热涂层技术等。在过去的30年中,涡轮进口温度提高了450℃,其中70%是由于采用了精铸空心叶片获得的,这项技术已成为决定高推重比发动机所能达到最高性能水平的关键技术。

大幅度减轻武器装备质量,降低制造成本。采用先进成型加工技术制造大型精密锻、铸件,采用先进焊接工艺制造的整体结构件,可减轻质量20%和降低成本30%左右,同时,还为设计人员提供了设计的灵活性。

常规成型加工技术逐步被现代技术改造。传统的锻、铸、焊、热及表面处理等工艺引进了计算机、真空和高能束等技术,被改造为高新技术。采用多向模锻、真空热处理、表面镀镉钛和喷丸及孔挤压强化处理等先进热工艺制造飞机起落架零件,可使起落架与飞机同寿命。

组合或复合成型工艺得到应用,如超塑性成型/扩散连接、形变热处理技术以及电弧与激光复合热源焊接等。

成型工艺过程的模拟技术发展迅速,如铸件凝固铸造过程的数值模拟、锻件和铸件缺陷形成及预测的数值模拟以及焊接热效应的数值模拟等。

成型加工技术与新结构、新材料并行发展,如摩擦焊接、热等静压和液相扩散焊等成型加工技术分别与整体涡轮转子、整体叶盘结构和大型夹芯结构风扇叶片及对开叶片等新结构并行发展;热等静压和超塑性锻造与粉末高温合金、液态金属快速冷却轧制与非晶态材料同步发展等。

成型加工技术是显著提高武器装备性能、大幅度减轻结构质量、降低制造成本和提高武器装备使用寿命及可靠性的关键技术,正沿着优质、高效、精密、大型和无污染的方向发展。为适应先进武器装备的发展,注重应用新材料和先进的成型技术具有重要意义。



### 0.3 本课程的教学要求

工程材料需要通过成型加工来实现其经济和社会价值。机械与制造工程类专业的学生必须认识到工程材料与成型加工技术的重要地位。应该注意的是孤立地谈论工程材料或成型技术是不全面的,工程材料与成型技术必须作为一个整体来考虑,从而使其具有科学性。本教材力图贯穿这一思路。因此,教学中应注意引导学生在以下方面进行思考。

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,最终成型后的零部件与结构必须保证武器装备在规定的寿命期间完成特定的任务。

成型加工、使用性能、材料性质和成分/组织四个因素之间有着密不可分的关系。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。

成型加工不但赋予了材料形状,同时也是使材料增值的经济活动,是保持产品竞争力的关键之一。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,在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技术关键之一。高性能的武器装备研制集中体现了成型加工的重要作用,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,才能确保武器装备的先进性。

创新的成型加工是装备研制过程中重要的科技活动。随着新材料与新结构在武器装备研制中的不断应用,对成型技术提出了更高的要求。发展先进的洁净、精确和快速成型技术,对于先进武器装备的研制至关重要。

# 第 1 章 工程材料的结构

工程材料的各种性能与材料的化学和物理组成结构是密切相关的。材料的结构主要指组成材料的原子的电子结构、分子的化学结构与聚集状态结构以及材料的显微组织结构。组成材料的原子或分子的空间结合与排列方式可以通过外界条件加以改变,从而实现材料性能的控制。要想更好地开发和利用材料,必须了解工程材料的结构。

## 1.1 材料粒子的键合方式

工程材料是由各种物质组成的,物质都是由粒子(原子、分子或离子)通过一定的键合方式聚集而成的。组成物质的粒子间的相互作用力叫化学键。物质的粒子种类以及相互间的键合方式是不同的,形成的键也具有不同的特性。键的特性又决定了材料的物理、力学和化学等方面的性能以及聚集状态和结构。工程材料的物质粒子的化学键主要有离子键、共价键和金属键。

### 1.1.1 离子键

金属与非金属组成的化合物是通过离子键而结合的。正电性的金属原子与负电性的非金属原子接触时,前者释放出最外层电子变成正离子,后者获得电子变成负离子,正、负离子由静电引力作用而相互结合形成离子化合物或离子晶体,这种相互作用就称为离子键。图 1-1 为 NaCl 的离子键结合示意图。

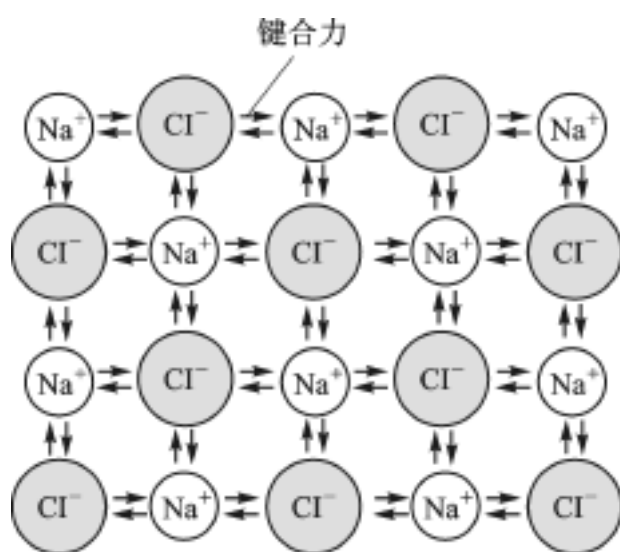


图 1-1 NaCl 的离子键合

离子键无方向性和饱和性,在各方向上都可以和相反电荷的离子相吸引,一个离子可以同时和几个异号离子相结合。例如,在 NaCl 晶体中,每个 Cl<sup>-</sup> 周围都有 6 个 Na<sup>+</sup>, 每个 Na<sup>+</sup> 周围也有 6 个 Cl<sup>-</sup> 等距离排列着。

离子键有很强的结合力,因此离子晶体的熔点、沸点、强度和硬度高,热膨胀系数小,但脆性大。离子化合物在常温下的导电率很低,典型的离子化合物是无色透明的。大部分盐类、碱类和金属氧化物多是离子化合物,部分陶瓷材料(MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>)及钢中的一些非金属夹杂物也以离子键方式结合。



### 1.1.2 共价键

共价键是由两个或两个以上的原子通过共有最外层电子的方式实现结合。共有的电子通常是成对的,共价键具有方向性和饱和性。共价键的结合力大,共价晶体的强度和硬度高,脆性大,熔点和沸点高。为使电子运动产生电流,必须破坏共价键,需加高温、高压,因此共价键材料具有很好的绝缘性。

元素周期表中同族非金属元素原子通过共价键形成分子或晶体,如两个氢核同时吸引一对电子而形成稳定的氢分子。单质硅、金刚石等属于共价晶体。1个硅原子与4个在其周围的硅原子共享其外壳层能级的电子,使外层能级壳层获得8个电子,每个硅原子通过4个共价键与4个邻近原子结合,构成正四面体,如图1-2所示。金刚石是自然界中最坚硬的固体,这种晶体由碳原子直接构成,每个碳原子与其相邻原子共有4个原子,形成4个共价键,构成正四面体。金刚石中碳原子间的共价键非常牢固,其熔点高达3750。锗、锡、铅等元素也可构成共价晶体。SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>等陶瓷和一些聚合物是以共价键形成的化合物,即共价化合物。

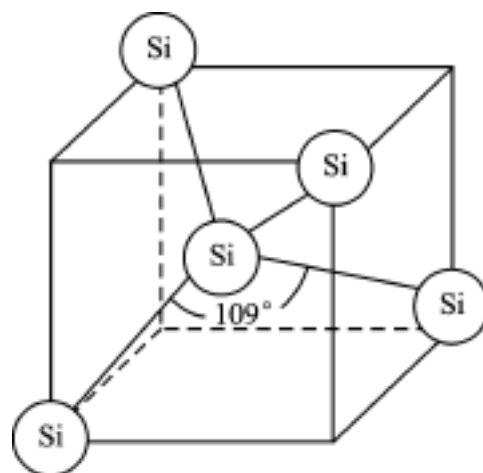


图1-2 Si原子形成的四面体

### 1.1.3 金属键

金属原子的外层价电子数较少,电离能也很小,极易失去最外层价电子而成为正离子。脱离原子的自由电子形成所有原子共有的“电子云”,固态金属正是依靠各正离子和自由电子的相互作用使金属原子紧密地结合在一起,这种结合方式称为金属键(见图1-3)。

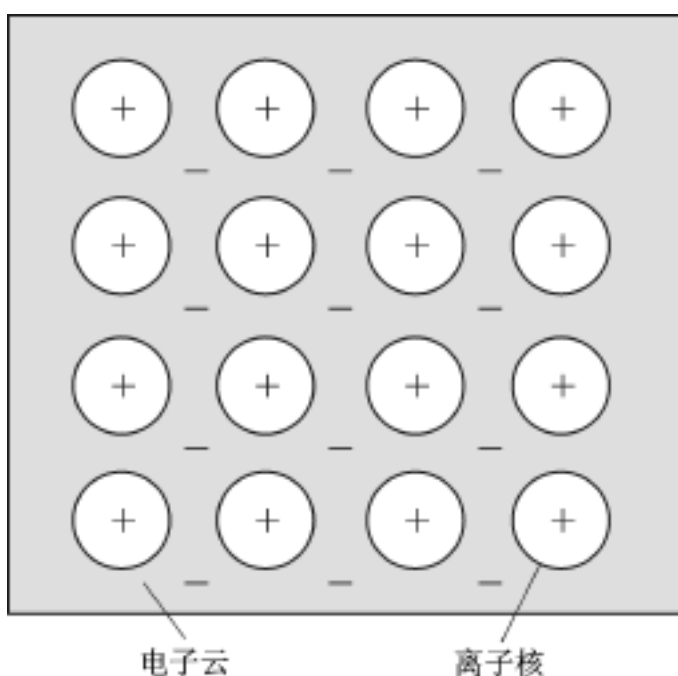


图1-3 金属键示意图

金属材料都具有金属键,金属键决定了金属的性能。当金属中有电位差时,自由电子就要向着高电位方向移动,形成电流。自由电子定向移动受到正离子的阻碍较小,就表现出良好的导电性。金属中热能传递不仅依靠正离子的振动,而且依靠自由电子的运动,故金属有良好的导热性。

金属材料都具有金属键,金属键决定了金属的性能。当金属中有电位差时,自由电子就要向着高电位方向移动,形成电流。自由电子定向移动受到正离子的阻碍较小,就表现出良好的导电性。金属中热能传递不仅依靠正离子的振动,而且依靠自由电子的运动,故金属有良好的导热性。

金属之所以有光泽,是由于自由电子容易被可见光激发,跳到离原子核较远的高能



级;当它重新跳回原来的低能级时,就把所吸收的可见光的能量以电磁波的形式辐射出来,从而表现出金属的光泽。在正离子的周围充满了自由电子,故各个方向上的结合力相同。固态金属各层原子发生相对位移时,金属键的结合力仍可保持,故金属可发生较大的永久变形而不断裂,即具有良好的塑性。

### 1.1.4 分子键

原子态惰性气体和分子态气体分子在低温下能聚集成液体和固体,其结合过程中没有电子的得失、共有或公有化,价电子的分布几乎不变,原子或分子之间的结合是依靠原子或分子

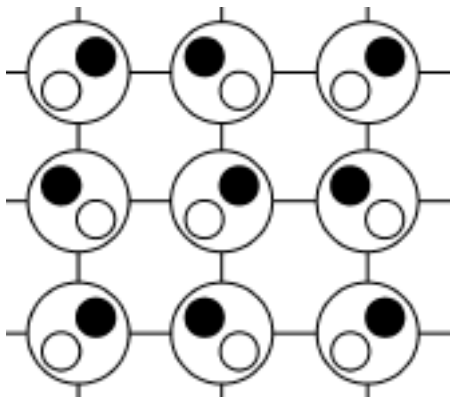


图 1-4 分子键示意图

偶极之间的作用力来实现的。这种结合方式称为分子键,也称为范德瓦尔斯(Vander Waals)力。图 1-4 为分子键示意图。当分子的正、负电荷瞬时分离时便形成偶极,偶极之间就存在着范德瓦尔斯力,此种作用力使分子结合成分子晶体(分子键的名称即由此而来)。

分子键是电中性的分子之间的长程作用力,其结合力很弱,由此所形成的固体熔点低,硬度也低,耐热性差,一般不具有导电能力。

表 1-1 总结了各种结合键的主要特点。

表 1-1 各种结合键的主要特点

类 型	作用力来源	键合强弱	形成晶体的特点
离子键	原子得、失电子后形成负、正离子。 正负离子间的库仑引力	最强	无方向性键,高配位数,高熔点,高强度,高硬度,低膨胀系数,塑性较差,固态不导电,熔态离子导电
共价键	相邻原子价电子各处于相反的自旋状态。 原子核间的库仑引力	强	有方向性键,低配位数,高熔点,高强度,高硬度,低膨胀系数,塑性较差,即使在熔态也不导电
金属键	自由电子与正离子之间的库仑引力	较强	无方向性键,结构密堆,配位数高,塑性较好,有光泽,有良好的导热、导电性
分子键	原子间瞬时电偶极矩的感应作用	最弱	无方向性键,结构密堆,高熔点,绝缘

## 1.2 金属的晶体结构

固态物质按其原子或分子的聚集状态可分为晶体和非晶体两大类。晶体中的原子或原子