



国防特色教材·职业教育

航空工程材料

HANGKONG GONGCHENG CAILIAO

主 编 王周让

● 副主编 王晓辉 ●

主 审 何西华

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

哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·职业教育

航空工程材料

主 编 王周让
副主编 王晓辉
主 审 何西华

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社
哈尔滨工程大学出版社

哈尔滨工业大学出版社
西北工业大学出版社

内 容 简 介

本书是根据“十一五”国防特色规划职业教材编写要求,结合高职航空类专业对航空工程材料的要求而编写的,突出课程的模块化和实用性,以航空工程零件材料的选择为目标,围绕这个目标将内容分解为五大模块:航空工程材料的结构与性能、航空工程材料的基本理论、热处理、常用航空工程材料及航空工程零件的选择。

本书内容简洁,通俗易懂,可操作性强,适合作为高等职业院校航空类专业的教材,也可作为航空工程技术人员、飞机维修人员、航空器维护人员和地勤人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

航空工程材料/王周让主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2010.2

ISBN 978-7-81124-824-1

I. 航… II. 王… III. 航空材料 IV. V25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 114563 号

航空工程材料

主 编 王周让

副主编 王晓辉

主 审 何西华

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(100191) 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:15.25 字数:342 千字

2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-81124-824-1 定价:27.00 元

前 言

本书是根据“十一五”国防特色规划职业教材编写要求,结合高职航空类专业对航空工程材料的要求而编写的。内容侧重于应用理论、应用技术和材料的选择,强调对学生的实践训练,贯彻以应用为目的,以掌握概念、强化应用为教学重点,以必需、够用为度的原则;重点突出,深入浅出,通俗易懂,教材清晰、形象,易于自学;习题与思考题可供课堂讨论和布置课后作业选用,以帮助学生思考、复习和巩固所学知识,培养分析和解决问题的能力。

为了突出课程的模块化和实用性,我们以航空工程材料的应用为目标,将内容分为五大模块,包括航空工程材料的结构与性能、航空工程材料的基本理论、热处理、常用航空工程材料(常用的航空用钢、有色金属及其合金、高分子材料、陶瓷材料、复合材料等)以及航空工程零件材料的选择。

第1章介绍了航空工程材料的结构与性能;第2章介绍了航空工程材料的基本理论;第3章介绍了钢的热处理;第4~8章介绍了常用航空工程材料的牌号、成分、组织、性能及应用;第9章介绍了航空工程零件的失效与材料的选择方法。本书各章对学习内容及学习方法均作了总结,并附有一定量的习题与思考题,便于巩固所学内容。

参加教材编写的有:陕西航空职业技术学院王周让、王晓辉、陈海英、赵华,陕西秦峰液压机械责任有限公司石峰。第3章由王周让编写,绪论、第1章、第5章和第6章由王晓辉编写,第2章和第4章由赵华编写,第7章和第8章由陈海英编写,第9章由石峰编写。本教材由王周让任主编,王晓辉任副主编,全书由王周让统稿。

本书由何西华主审。他在百忙之中对书稿进行了认真的审阅,并提出了非常宝贵的建议,对书稿的完善起到了十分重要的作用,在此对他表示衷心的感谢。

尽管我们在教材编写过程中,力求在行业特色、技术实用和能力培养方面有所创新,但是由于编者的水平和视角有限,若教材中仍有不足和疏漏之处,恳请广大师生和读者批评指正。

编 者

2009年6月

目 录

绪 论	1
0.1 航空工程材料的地位和作用	1
0.2 航空工程材料的历史、现状及发展趋势	1
0.2.1 航空工程材料的发展历史、现状	1
0.2.2 航空工程材料的发展趋势	2
0.3 课程的性质、基本要求及学习方法	2
0.3.1 性 质	2
0.3.2 基本要求	2
0.3.3 学习方法	3
第 1 章 材料的结构与性能	4
1.1 金属的结构与性能	4
1.1.1 纯金属的晶体结构	4
1.1.2 合金的晶体结构	8
1.1.3 金属材料的性能	11
1.2 高分子材料的结构与性能	19
1.2.1 高分子材料的结构	19
1.2.2 高分子材料的性能	20
1.3 陶瓷材料的结构与性能	23
1.3.1 陶瓷材料的结构	23
1.3.2 陶瓷材料的性能	25
本章小结	27
习题与思考题	28
第 2 章 金属材料结晶和变形	29
2.1 纯金属的结晶	29
2.1.1 纯金属的结晶概述	29
2.1.2 同素异晶转变	30
2.1.3 控制晶粒大小的措施	31

2.2 合金的结晶	32
2.2.1 二元合金的结晶	32
2.2.2 合金性能与相图的关系	35
2.3 铁碳合金相图	37
2.3.1 铁碳合金的基本组织	37
2.3.2 Fe-Fe ₃ C 相图分析	38
2.3.3 Fe-Fe ₃ C 相图的应用	44
2.4 碳 钢	45
2.4.1 杂质元素对钢性能的影响	45
2.4.2 碳钢的分类	46
2.4.3 碳钢的牌号、性能及应用	47
2.5 铸 铁	52
2.5.1 铸铁的分类	52
2.5.2 铸铁的石墨化	53
2.5.3 常用铸铁	54
2.6 金属的塑性加工	60
2.6.1 金属的塑性变形	60
2.6.2 冷塑性变形对金属组织和性能的影响	61
2.6.3 塑性变形后的金属在加热时组织和性能的变化	62
2.6.4 金属材料的热加工与冷加工	63
本章小结	64
习题与思考题	64
第3章 钢的热处理	66
3.1 钢的热处理原理	66
3.1.1 钢在加热时的组织转变	66
3.1.2 钢在冷却时的组织转变	69
3.2 钢的退火与正火	78
3.2.1 退 火	78
3.2.2 正 火	80
3.3 钢的淬火与回火	81
3.3.1 淬 火	82
3.3.2 回 火	87
3.4 钢的表面热处理	89

3.4.1 钢的表面淬火	90
3.4.2 化学热处理	91
3.5 热处理技术条件标注与工序安排	96
3.5.1 热处理技术条件标注	96
3.5.2 热处理工序位置的安排	96
3.6 热处理新技术简介	98
3.6.1 真空热处理技术	98
3.6.2 形变热处理	98
3.6.3 激光淬火和电子束加热表面淬火	99
本章小结	99
习题与思考题	100
第4章 合金钢	103
4.1 合金钢的分类与牌号	103
4.1.1 合金钢的分类	103
4.1.2 合金钢的牌号	103
4.2 合金结构钢	104
4.2.1 合金渗碳钢	104
4.2.2 合金调质钢	107
4.2.3 合金弹簧钢	109
4.2.4 超高强度钢	111
4.2.5 滚动轴承钢	113
4.3 合金工具钢	115
4.3.1 合金刃具钢	115
4.3.2 合金模具钢	118
4.3.3 量具钢	122
4.4 不锈钢	123
4.4.1 金属的腐蚀	123
4.4.2 不锈钢的分类及应用	124
4.5 高温合金	127
4.5.1 镍基高温合金	127
4.5.2 其他高温合金	128
4.5.3 高温合金在航空发动机上的应用	129
本章小结	131

习题与思考题	131
第5章 有色金属	133
5.1 铝及铝合金	133
5.1.1 铝合金的分类与牌号	133
5.1.2 工业纯铝	134
5.1.3 变形铝合金	135
5.1.4 铸造铝合金	138
5.1.5 铝合金在飞机中的应用	140
5.2 铜及铜合金	141
5.2.1 工业纯铜	141
5.2.2 铜合金	142
5.3 钛及钛合金	147
5.3.1 工业纯钛	147
5.3.2 钛合金	148
5.3.3 钛合金的应用	151
5.4 镁及镁合金	152
5.4.1 纯 镁	152
5.4.2 镁合金	152
5.4.3 镁合金的应用	154
5.5 滑动轴承合金	155
本章小结	157
习题与思考题	157
第6章 粉末冶金材料与功能材料	159
6.1 粉末冶金材料	159
6.1.1 粉末冶金工艺及材料分类	159
6.1.2 常见的粉末冶金材料	159
6.2 功能材料	163
6.2.1 概 述	163
6.2.2 电功能材料	164
6.2.3 磁功能材料	165
6.2.4 热功能材料	168
6.2.5 光功能材料	169

6.2.6 其他功能材料	170
本章小结	171
习题与思考题	171
第7章 高分子材料	172
7.1 塑 料	172
7.1.1 塑料的基本概念	172
7.1.2 塑料的组成	172
7.1.3 塑料的分类	173
7.1.4 塑料的性能	175
7.1.5 常用工程塑料	176
7.2 橡 胶	177
7.2.1 橡胶的基本概念	177
7.2.2 橡胶的性能	177
7.2.3 航空用橡胶的主要品种	178
7.3 胶粘剂	183
7.3.1 胶粘剂的分类、组成	183
7.3.2 胶粘剂的主要应用	186
7.4 涂 料	186
7.4.1 涂料的基本概念	186
7.4.2 涂料的分类和主要品种	187
本章小结	188
习题与思考题	189
第8章 陶瓷材料与复合材料	190
8.1 陶瓷材料	190
8.1.1 陶瓷材料的分类	190
8.1.2 陶瓷材料的应用	191
8.2 复合材料	192
8.2.1 复合材料概述	192
8.2.2 聚合物基复合材料及其在航空航天方面的应用	197
8.2.3 金属基复合材料及其在航空航天方面的应用	206
8.2.4 陶瓷基复合材料及其在航空方面的应用	214
8.2.5 碳/碳复合材料及其在航空方面的应用	217

本章小结·····	220
习题与思考题·····	221
第 9 章 零件的失效与材料的选择·····	222
9.1 零件的失效形式·····	222
9.1.1 失效形式·····	222
9.1.2 失效原因·····	222
9.2 材料的选择·····	223
9.2.1 材料选择的一般原则·····	223
9.2.2 材料选择的一般步骤·····	224
9.2.3 典型飞机零件的选材·····	224
本章小结·····	226
习题与思考题·····	226
附录 A 钢的硬度及抗拉强度换算表·····	227
附录 B 热处理工艺分类及代号 (GB/T 12693—90)·····	231
参考文献·····	233

绪 论

0.1 航空工程材料的地位和作用

航空工程材料及其制备技术是材料科学领域的一个重要分支,是航空现代化和科技发展的物质基础和先导。航空工程材料的发展水平是衡量一个国家的国防科学技术和经济实力的重要标志之一,对社会文明进步有着至关重要的影响。

航空工程材料泛指用于制造航空飞行器的材料。军用飞机包括机身、发动机、机载电子和火力控制四大部分,民用客机包括机身、发动机、机载电子和机舱四大部分。无论是军用飞机还是民用飞机,机体材料和发动机材料都是最重要的结构材料,电子信息材料则是航空机载装置中最重要的功能材料。飞行器作为一个整体,还用到少量非结构型材料,如阻尼、减振、吸噪和密封材料等。

0.2 航空工程材料的历史、现状及发展趋势

0.2.1 航空工程材料的发展历史、现状

莱特兄弟 100 年前用一些天然材料及工艺制造出第一架飞机。其中骨架用的是木材,蒙皮用的是浸树脂的棉布。

20 世纪 30 年代末,有了著名的“蚊式”飞机,该机有“木材奇迹”之称。利用木质复合板制造机身和蒙皮,其性能胜过当时所有的战斗机。

1912 年德国人成功设计了世界第一架用铝铜合金蒙皮制造的全金属单翼飞机。

直到 20 世纪 30 年代,全金属承力蒙皮才逐渐成为普遍的结构形式。

20 世纪 50 年代,钛合金开始广泛应用于发动机高温部位,至今仍是发动机压气机的主要材料。

20 世纪 70 年代的 B-2 轰炸机,其机身和机翼的大部分均采用碳纤维增强的复合材料,例如,美国的 F-22 机中先进复合材料用量占 24%,现代民机中占 14%左右,现代直升机中有的超过了 50%。

我国目前已定型生产的航空工程材料及相应的标准与规范,基本上能满足第二代航空产品批量生产的需求,支撑着第三代航空产品的研制,但远不能满足第四代航空产品对材料的需

求。针对第三代航空产品所需关键材料,如热强钛合金、高强铝合金、超高强度结构钢不锈钢、树脂基复合材料、单晶向与粉末高温合金等,从技术上已经具备试用条件,但是转化为在特定工况下使用的零部件,并体现出第三代航空产品的总体效能,尚需做大量的工作。当前我国航空工程材料存在的问题有:材料牌号多、乱,且重复,没有形成适合我国国情的材料、工艺及理化监测标准系列;材料性能数据“少、缺、散”现象严重;材料的实物质量低。总体上看,当前国内生产的航空工程材料,其标准质量(指技术标准规定的质量标准)基本上达到或接近国际水平,但材料的实物质量却普遍低于国际水平。主要表现在不同炉批的材料,其成分与性能虽然符合标准规定,但波动范围较大,材质的一致性、均匀性和稳定性较差。

0.2.2 航空工程材料的发展趋势

航空工程材料的发展趋势是种类增多,成本降低,性能提高。具体表现为传统材料大有可为;新型材料亟待应用;新兴材料层出不穷;材料的通用化、标准化势在必行;可靠性、可维修性、低成本和环保性要求日趋严格。

0.3 课程的性质、基本要求及学习方法

0.3.1 性 质

航空工程材料是高职航空类专业必修的技术基础课。它是从生产实践中发展起来,又直接为生产服务的一门课程,具有丰富的理论性和实践性。

0.3.2 基本要求

通过学习,使学生获得有关航空工程材料的基本理论、基本知识;了解常用航空工程材料的成分、工艺、组织和性能之间的关系;初步具备合理地选用航空工程材料的能力。

学生通过本课程的学习,应达到下列要求:

- ① 掌握金属力学性能、晶体结构和铁碳合金相图等金属学的基本知识;
- ② 掌握航空工程材料的分类、牌号(或代号)、性能特点及用途;
- ③ 能够根据零件的工作条件选用材料;
- ④ 初步具备正确选定零件的热处理方法及确定其工序位置的能力;
- ⑤ 了解与本课程有关的新材料、新工艺、新技术及其发展趋势。

0.3.3 学习方法

本课程具有实践性强的特点,其内容与生产、生活密切相关。为达到教学要求,学习应做好以下几个方面:学习中应注重分析、理解与运用,并注意前后知识的衔接与综合应用;重视理论联系实际,重视实验环节,认真完成作业;本课程涉及的知识面广,内容较丰富,在教学中应多采用直观教学、电化教学和启发式教学,并培养学生的自学能力,以增加课堂的信息量和课时的利用率,并应在后续课程和生产实习、课程设计、毕业设计等教学环节中反复练习,巩固提高。

第 1 章 材料的结构与性能

工程上使用的材料大部分是固态物质,其性能取决于材料的化学成分和内部的组织结构。固态物质按照其原子(离子或分子)的聚集状态可以分为两大类:晶体和非晶体。原子(离子或分子)在三维空间有规则的、周期性重复排列的物体称为晶体,如天然金刚石、水晶、固态金属及合金等。晶体具有固定的熔点,呈现规则的外形,并具有各向异性特征。原子(离子或分子)在三维空间无规则排列的物体称为非晶体,如松香、石蜡、玻璃、沥青等。非晶体没有固定的熔点,其结构呈现无序,并具有各向同性特征。由于金属由金属键结合,其内部的金属离子在空间有规则地排列,因此固态金属均是晶体。

1.1 金属的结构与性能

1.1.1 纯金属的晶体结构

1. 基本概念

金属晶体内部原子是按一定的几何规律排列的。为了便于理解,人们把原子看成一个刚性小球,这样就可将金属看成是由刚性小球按一定的几何规则紧密堆积而成的物体,如图 1-1 所示。

(1) 晶 格

为研究晶体中原子的排列规律,假定理想晶体中的原子都是固定不动的刚性球体,并用假想的线条将晶体中各原子中心连接起来,便形成了一个空间格架。这种表示原子在晶体中排列规律的空间格架,简称晶格,如图 1-2 所示。

(2) 晶 胞

能够完全反映晶格特征的、最小的几何单元称为晶胞,如图 1-3 所示。晶胞在三维空间的重复排列构成晶格。

(3) 晶格常数

不同元素的原子半径大小不同。在组成晶胞后,晶胞的大小是不相同的,晶胞的形状可用棱边长度 a 、 b 、 c 及棱边夹角 α 、 β 、 γ 来表示。晶胞的棱边长度称为晶格常数,以埃(\AA)为单位来表示($1 \text{\AA} = 10^{-8} \text{ cm}$),如图 1-4 所示。

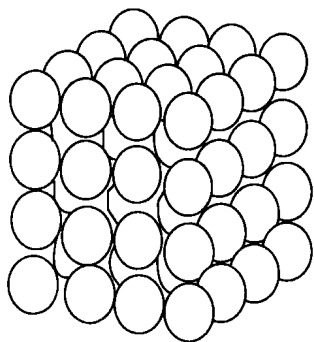


图 1-1 晶体中的原子堆积模型

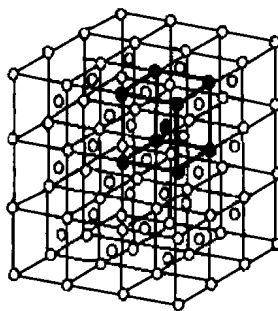


图 1-2 晶格的抽象模型

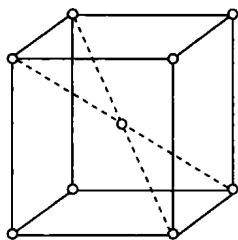


图 1-3 晶胞

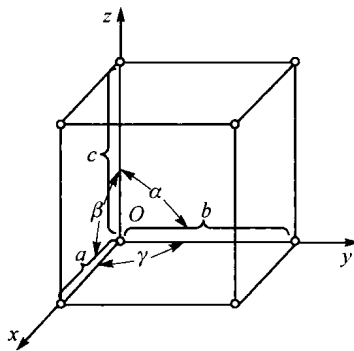


图 1-4 晶格常数

2. 常见金属的晶格类型

常见的金属晶格类型有体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格三种类型。

(1) 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞是一个立方体,其晶格常数 $a=b=c$ 。在立方体的八个角上和立方体的中心各有一个原子,如图 1-5 所示。每个晶胞中实际含有的原子数为 $(1/8) \times 8 + 1 = 2$ 个。属于体心立方晶格的金属有铬(Cr)、钨(W)、钼(Mo)、钒(V)、 α 铁(α -Fe)等。

(2) 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞也是一个立方体,其晶格常数 $a=b=c$ 。在立方体的八个角和立方体的六个面的中心各有一个原子,如图 1-6 所示。每个晶胞中实际含有的原子数为 $(1/8) \times 8 + 6 \times (1/2) = 4$ 个。属于面心立方晶格的金属有铝(Al)、铜(Cu)、镍(Ni)、金(Au)、银(Ag)、 γ 铁(γ -Fe)等。

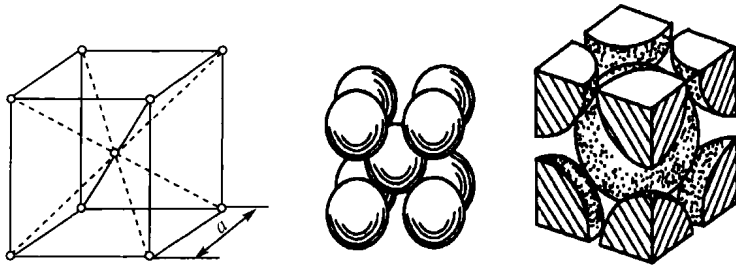


图 1-5 体心立方晶胞

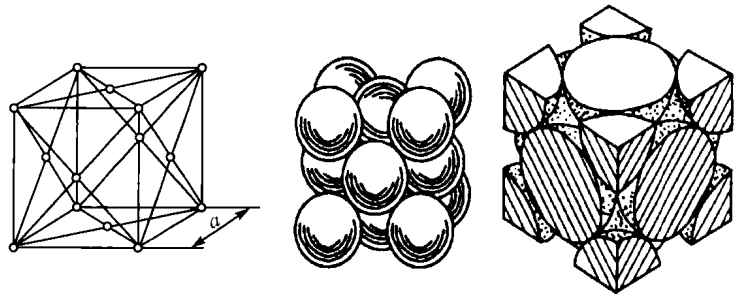


图 1-6 面心立方晶胞

(3) 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞是一个正六方柱体，它由六个呈长方形的侧面和两个呈正六边形的底面所组成。该晶胞要用两个晶格常数表示，一个是六边形的边长 a ，另一个是柱体高度 c 。其晶胞的十二个角上和上、下底面中心各有一个原子，另外在晶胞中间还有三个原子，如图 1-7 所示。每个晶胞中实际含有的原子数为 $(1/6) \times 12 + (1/2) \times 2 + 3 = 6$ 个。属于密排六方晶格的金属有镁 (Mg)、锌 (Zn)、铍 (Be) 等。

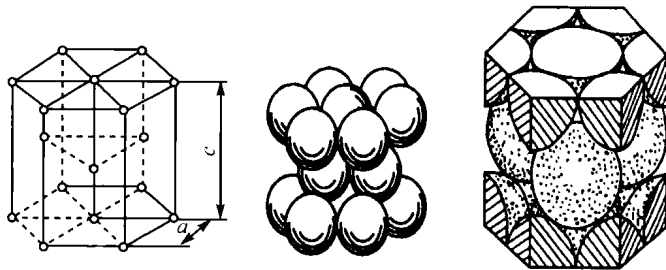


图 1-7 密排六方晶胞

3. 实际晶体结构

(1) 多晶体结构

实际工程上用的金属材料都是由许多颗粒状的小晶体组成的，每个小晶体内部的晶格位

向是一致的,而各小晶体之间位向却不相同。这种不规则的、颗粒状的小晶体称为晶粒,晶粒与晶粒之间的界面称为晶界,由许多晶粒组成的晶体称为多晶体,如图1-8所示。一般金属材料都是多晶体结构。

(2) 晶体缺陷

在实际金属中,原子排列并非完全规则和完整。晶体内部出现原子排列不规则、不完整的区域称为晶体缺陷。根据缺陷的几何特点,可将其分为以下三种类型:

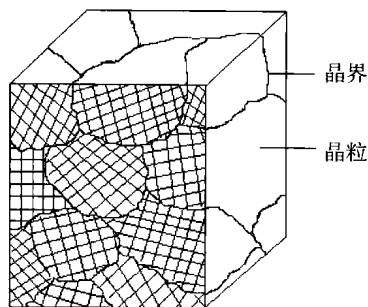


图1-8 金属的多晶体结构

① 空位和间隙原子,属于点缺陷,如图1-9所示。

在实际晶体结构中,晶格的某些结点往往未被原子占有,这种空着的结点位置称为晶格空位;处在晶格间隙中的原子称为间隙原子。在晶体中由于点缺陷的存在,将引起周围原子间的作用力失去平衡,使其周围原子向缺陷处靠拢或被撑开,从而晶格发生歪扭,这种现象称为晶格畸变。晶格畸变会使金属的强度和硬度提高。

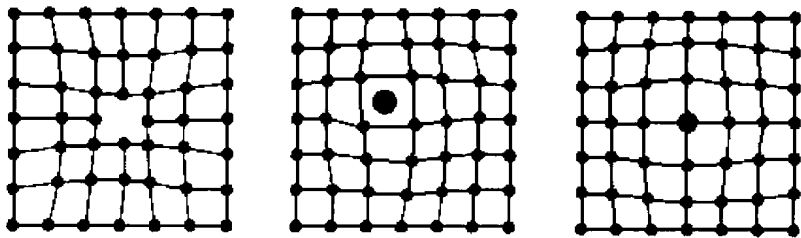


图1-9 晶格空位和间隙原子

② 位错,属于线缺陷。位错的基本类型为刃型位错和螺型位错两种。其中刃型位错是比较简单的一种,如图1-10所示。这种缺陷的特点是:在晶体的某一个晶面的上下两部分的原子面产生错排,就好像沿着某方位的晶面插入的一个多余原子面,但又未插到底,犹如插入刀刃一般,故称为刃型位错。

常用位错密度来描述位错数量的多少,它是指晶体中单位体积所包含的位错线的长度。晶体中位错的存在,对晶体力学性能将产生很大的影响。当金属为理想晶体或仅含极少量位错时,金属的屈服强度 σ_s 很高;当含有一定量的位错时,强度降低;当进行形变加工时,位错密度增加,屈服强度 σ_s 将会增高,如图1-11所示。

③ 晶界和亚晶界,属于面缺陷。实际金属材料一般为多晶体,其相邻两晶粒之间的位向差大多为 $30^\circ\sim 40^\circ$ 。晶界处原子的排列必须从一种晶粒的位向过渡到另一种晶粒的位向,因此晶界成为两晶粒之间原子无规则排列的过渡层,如图1-12(a)所示。在实际金属晶体中的晶粒内部,存在许多小晶块,它们之间的位向差很小,只有几分、几秒,一般为 $1^\circ\sim 2^\circ$,它们相互镶嵌成一颗晶粒。在这些小晶块的内部,原子排列的位向是一致的,这些小晶块称为亚晶粒