

航空材料学

Aeronautical Material Science

主编 康进兴 马康民

主审 李应红



国防工业出版社

National Defense Industry Press

013040891

V25

21

航空材料学

主编 康进兴 马康民
主审 李应红



国防工业出版社

· 北京 ·



北航

C1649146

V25
21

188090810

内 容 简 介

本书从飞行器动力工程、机械工程及自动化专业本科生教学实际出发,结合航空材料应用及发展,以金属结构材料为主要内容,同时简要介绍有机高分子材料、复合材料和隐身材料。在各类材料的讲述中,首先介绍基本概念、基本理论和研究方法,其次论述其牌号、组织、性能及应用;在最后一章介绍了航空构件断裂失效分析,体现了本教材在航空装备中的实用性。

本书是航空类院校飞行器使用、维修、监造等专业本科生教材,亦可供航空装备制造技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空材料学 / 康进兴, 马康民主编. —北京: 国防工业出版社, 2013. 3

ISBN 978-7-118-08506-8

I. ①航... II. ①康... ②马... III. ①航空材料—高等学校—教材 IV. ①V25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 048571 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 19½ 字数 490 千字

2013 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 45.00 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

前 言

航空材料的每次重大突破,都促进航空技术发生了跨跃式的发展;航空材料不仅是航空事业发展的物质基础,更是航空事业发展的技术支撑;航空材料及其技术是世界各国优先发展和激烈竞争的重要领域,已成为国家安全战略的重要组成部分。目前,航空材料正朝着高性能化、高功能化、多功能化、结构功能一体化、复合化、智能化、低成本的方向发展。因此,在培养从事航空装备使用和维修等专业技术人员时,如何适应航空材料的发展和教学改革的需要,高质量地完成航空材料学的教学任务已成为高校教师研究的重点课题。本教材是空军工程大学航空材料学课程多年来的教学成果,它以理论够用、重在应用,前瞻发展为原则。在编写过程中,努力探索本课程的教学特点,力争使本教材的起点更高一些,内容更新一些,与航空装备联系更紧密一些;在专业名词使用上,为适应材料科学与工程的发展,参考了2010年全国科学技术名词审定委员会公布的材料科学技术名词。为此,本教材以航空金属结构材料为重点内容,同时兼顾有机高分子材料、复合材料和隐身材料;简要介绍基本概念、基本理论和研究方法,重点介绍现役飞机上使用材料的牌号、成分、组织、性能和工艺特点,增加航空构件断裂失效分析的内容,充分体现实用特色。

全书共分五大部分,即金属材料、有机高分子材料、复合材料、隐身材料和失效分析简介。其中金属材料为学习的重点内容,首先讲授金属学的基础知识、基本理论和研究方法,其次按合金钢、高温合金、轻合金等章节,详细介绍航空常用的金属材料。

本书绪论、第2、9章由空军工程大学马康民教授编写,第1章由空军工程大学龙霓东副教授编写,第3、6章由空军工程大学姚东野编写,第4、5、7章由空军工程大学康进兴博士编写,第8章及附录由空军工程大学杨竹芳编写,第10章由航空材料研究院邢丽英研究员和王智勇研究员编写,第11章由空军装备研究院李松航高工编写。

李应红教授审阅了全书,并提出了不少宝贵意见,特此致谢。

本教材的出版,得到了空军工程大学航空航天工程学院以及马千里参谋的大力支持,在此深表谢意。

对本教材编写和出版付出劳动的工作人员,表示衷心感谢。

书中错误和不妥处,敬请批评指正。

编 者

2012年7月

目 录

绪论	1
0.1 材料在国民经济中的地位	1
0.2 材料的分类	2
0.3 航空材料发展简史	2
0.4 航空材料学的性质与任务	2
0.5 航空材料学的特点和学习方法	3
第1章 金属学的基础知识	4
1.1 固体结构	4
1.2 纯金属的晶体结构	9
1.3 纯金属的结晶	13
1.4 实际金属的晶体缺陷	14
1.5 合金的相结构	26
1.6 Fe - Fe ₃ C 相图	31
习题及思考题	46
第2章 金属的力学性能	47
2.1 载荷的种类和金属的变形	47
2.2 金属的拉伸强度和塑性	47
2.3 金属的硬度	51
2.4 金属的韧性	54
2.5 金属的抗疲劳性	59
习题及思考题	60
第3章 金属的塑性变形与再结晶	61
3.1 金属单晶体的塑性变形	61
3.2 金属多晶体的塑性变形	66
3.3 变形金属在加热时组织和性能的变化规律	70
习题及思考题	75
第4章 钢的热处理	76
4.1 钢的热处理原理	76

4.2	钢的热处理工艺	88
4.3	钢的化学热处理	98
4.4	表面淬火	104
	习题及思考题	104
第5章	合金钢	106
5.1	合金钢概述	106
5.2	低合金结构钢	112
5.3	不锈钢	122
	习题及思考题	132
第6章	高温合金	134
6.1	概述	134
6.2	涡轮叶片常用高温合金	144
6.3	燃烧室常用高温合金	149
6.4	涡轮盘常用高温合金	152
	习题及思考题	157
第7章	轻合金	158
7.1	铝合金	158
7.2	钛合金	185
7.3	镁合金	205
	习题及思考题	210
第8章	高分子材料	211
8.1	橡胶材料	211
8.2	飞机座舱透明材料	222
8.3	航空涂料	227
	习题及思考题	235
第9章	复合材料	236
9.1	复合材料概述	236
9.2	复合材料的复合机制与原则	240
9.3	常用复合材料	243
	习题及思考题	250
第10章	隐身材料	251
10.1	雷达隐身材料	251

10.2	红外隐身材料	263
10.3	红外/雷达兼容多频谱隐身材料	270
	习题及思考题	271
第 11 章	航空构件断裂失效分析	272
11.1	概述	272
11.2	断裂失效分析的一般步骤	274
11.3	断裂分类及特征	279
11.4	金属断裂的断口分析	285
	习题及思考题	296
附录		298
附录 A	黑色金属硬度及强度换算表	298
附录 B	国内外部分常用钢牌号对照表	302
附录 C	国内外部分铝及其合金牌号对照表	305
参考文献		306

绪 论

0.1 材料在国民经济中的地位

所谓材料,广而言之是指人类赖以生活和生产的物质,如水、空气、粮食、矿石、木材等。确切地讲,可以用来制造有用的构件、器物或物品等的物质称为材料。人类的生活用品、生产和交通工具,以及作战武器等,无一不是用材料加工制成的。没有材料,可以说人类就无法生存和繁衍,社会就不能进步和发展。所以人们常常把材料说成是发明之母,把材料比做现代化的骨肉。事实上,材料与人类的出现和进化有着密切的联系。材料的发展促进生产力的发展和社会进步的历史,充分说明了这种密切的关系。原始社会延续了几十万年,原因之一就是当时的材料发展极其缓慢,人们所用的材料是岩石、木材和骨骼等,生产工具极为落后,生产力非常低下。青铜的出现,使人类使用的工具和生活用具大为改观,生产效率大为提高,人类便从原始社会跨入了奴隶社会。奴隶社会只延续了几千年,表明新材料的出现,加速了生产力的发展,从而大大加速了社会发展的进程。铁的出现,又把人类从奴隶社会带进了封建社会。社会的发展更加迅速,铁制工具的生产效率比青铜更高。因此,历史学家曾把人类社会的发展和材料的发展有机地联系在一起,以材料发展为标志,把人类社会与自然界斗争的历史划分为石器时代、青铜器时代和铁器时代,它标志着人类生产大发展的三个飞跃阶段,也是人类文化进步的三个里程碑。

我国人民是世界上最早掌握青铜、钢铁冶炼和加工技术的民族之一。远在 3000 多年前的商代初期,已有了发达的青铜冶炼技术,并用来制造刀、剑、矛、盾等各种兵器。春秋战国时期,铸铁的生产和应用已显著扩大,随后发展到由铸铁而炼钢,并相继采用了各种热处理工艺来改善钢和铸铁的性能。特别是经过盛唐时代的大发展,我国钢铁生产一直在世界遥遥领先。与此同时,铜合金也由青铜发展到黄铜和白铜,其他材料也有了相应的发展。可见我国劳动人民无论在早期金属材料的发展,还是在钢铁材料发展的初期和中期,都曾有过辉煌的成就,为人类做出了巨大的贡献。

现在已进入了信息时代,传统的青铜、钢铁材料虽然仍在起着重要作用,但已不能满足信息时代对材料的要求,这就需要发展新材料和发展制造新材料的新技术。宇宙飞船、航天飞机能安全进入太空轨道运行,又能顺利返回地球表面,如果没有烧蚀材料是不可能实现的。单晶硅的问世,在传递信息方面起了重大作用。据说,几百年前哥伦布发现美洲新大陆时,西班牙女王在半年之后才得到消息。今天,我们可以目睹“神九”与“天宫一号”在太空对接及航天员进行太空实验的过程。奇迹的出现,如果没有半导体等材料的发展,那是难以想象的。

材料科学是对人类经济和科学活动影响面最大、最直接的科学技术基础领域,也是世界各国优先发展和竞争激烈的重要领域,是 21 世纪人类发展新能源、信息通信以及生命科学和生物技术、改善生存环境的物质基础。材料科学技术的研发能力已经成为衡量一个国家综合实力的重要标志。在漫长的历史发展长河中,材料一直扮演着划分时代的作用。历史证明,一种新材料的问世,往往孕育着一批新技术产业的诞生,给人类社会的进步带来革命性的巨大推进。因此,熟悉材料的结构、性能和用途,了解材料的历史、现状,并预见其未来,对于国民经济

的发展具有重要的现实意义。

0.2 材料的分类

材料的种类很多,据统计已近 40 万种。常用的材料分类方法有:按用途分类法,按性能分类法,按化学成分分类法等。若按用途分类,材料常被分为建筑材料(水泥、玻璃、钢筋、沥青、石料等)、能源材料(煤、石油、天然气等)、生物材料(各种医药用品)、航空航天材料(钢铁、有色金属、橡胶、复合材料等)等。若按性能分类,常将以力学性能为使用性能的材料称为结构材料,如飞机蒙皮、起落架、航炮所用的金属材料都属于结构材料;而将以光、电、磁、热、声等性能为使用性能的材料称为功能材料,如半导体材料、磁铁、热电偶、光导纤维、隐身材料等。若按化学成分分类,材料又被分为金属材料(如钢铁、有色金属、贵金属等)、无机非金属材料(如陶瓷、耐火材料、水泥等)、有机高分子材料(如橡胶、塑料、涂料等)、复合材料(如玻璃钢、帘子布与橡胶复合的轮胎用材等)。

0.3 航空材料发展简史

航空材料是制造飞机(包括飞行器)、航空发动机及其附件、仪表及随机设备等所用材料的总称,通常包括金属材料(结构钢、不锈钢、高温合金、有色金属及合金等)、有机高分子材料(橡胶、塑料、透明材料、涂料等)和复合材料。

早期的飞机结构简单,所用的材料主要是木材、布和绳索等;20 世纪 30 年代,飞机逐渐发展成为全金属结构,动力装置则为活塞式发动机,所用的材料也只有钢铁、铝合金和镁合金等。

由于作战迫切需提高飞机的飞行速度,喷气式发动机应运而生。尽管喷气式发动机的原理早为人们所知,但这种发动机的制造成功,还是在耐热合金出现以后。

喷气式发动机完成了航空技术的一次飞跃——突破了“声障”。但随即又出现了“热障”问题。“热障”是当飞机超声速飞行时,飞机蒙皮表面附面层空气因摩擦而生成大量的热,使飞机蒙皮的温度急剧升高,当温度超过 250°C 时,铝合金就不能用了。这样直到 20 世纪 40 年代末,出现钛合金以后,航空技术才又一次出现飞跃——突破了“热障”。

在科学技术迅猛发展的今天,飞机正朝着超高速、巨型、隐身、智能的方向发展,对航空材料提出了越来越高的要求;同时,航空材料也随着科学技术的进步而逐渐发展,新材料新工艺不断涌现,为航空事业的发展提供了物质保障。

近几十年来,新型航空材料及先进工艺发展很快,如高强度铝合金、钛合金、高温合金、超高强度钢、复合材料、隐身材料及定向凝固叶片技术、定向共晶叶片技术、粉末高温合金涡轮盘制造技术等,为第四代、第五代飞机的发展提供了物质保障。航空发展史证明,航空材料的每次重大突破,都会促进航空技术产生飞跃式的发展;航空材料不仅是航空事业发展的物质基础,更是航空事业发展的技术支撑。

0.4 航空材料学的性质与任务

航空材料学是研究航空材料的组成、结构、工艺、性能与使用效能之间相互关系的一门

科学。

与材料学的其他分支一样,航空材料学的发展也经历了由经验性认识到规律性认识,由宏观现象的测试到微观本质探讨的过程。它与许多专业学科互相渗透,形成了一门新的综合性学科——航空材料学。它包括金属物理、强度理论、高分子物理、高分子化学等基础知识;并研究材料的性能、结构及状态之间的关系;研究高性能的航空材料和先进工艺技术的综合应用;研究航空产品在使用中失效原因与材料本身的关系等。目的在于利用这些关系和规律来指导科学研究和生产实践,以便充分发挥现有材料的潜力,并进而创造出新材料。对于从事航空维修工作人员来说,学习本课程的目的在于了解和掌握有关航空材料学的基本理论、航空材料的主要性能、决定和影响材料性能的主要因素,以及材料破断分析的一般方法,为合理使用航空材料和正确实施航空维修打基础。

0.5 航空材料学的特点和学习方法

航空材料学正在经历从经验性认识向规律性认识的发展过程,是一门理论和实践并重的应用型学科。它是在生产实践和科学研究基础上发展起来的实验性学科,具有丰富的理论性和实践性,与物理、化学、力学、冶金等其他学科联系较广,且材料种类繁多,在学习过程中,许多材料的组成、性质容易混淆。因此,在学习本课程时,应在掌握基本理论的基础上,以材料性能为中心,把材料成分—结构—性能—应用有机地联系起来,搞清楚成分、结构与性能的关系,以及性能的优缺点与用途、工艺、维修工作的关系,掌握其规律性;熟练地掌握解决问题的思路和方法,培养勇于探索、勇于实践的能力和自觉性;同时,要注意结合航空装备用材的实际,针对机务工作中出现的构件断裂、腐蚀、疲劳等问题,从材料、工艺上查找原因,以加深对所学知识的理解和记忆,并逐步培养学习本课程的积极性和解决实际问题的能力。

第1章 金属学的基础知识

飞机及其动力装置、附件、随机设备等各部分零部件都会用到金属材料,它们的力学性能、物理性能及化学性能等取决于材料的化学成分和内部组织结构。为了便于后续章节的学习,本章介绍固体的结构、纯金属的晶体结构、实际金属晶体的缺陷、合金相结构等基本概念、基本理论,阐述金属的结晶过程、金属的位错理论及 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图等内容。

1.1 固体结构

自然界存在的固态物质按其原子(或离子、分子、原子团)的聚集状态分为两大类:晶体与非晶体。在晶体中,原子(或离子、分子、原子团)在三维空间作有规则的周期性重复排列;而非晶体中这些质点无规则地堆积在一起,没有确定的排列方式。大多数固体物质是晶体,晶体在航空材料中占有十分重要的地位。

1.1.1 基本概念

晶体材料中原子按一定对称性周期性平移重复而形成的空间排列形式称为晶体结构。为了便于研究晶体结构,将实际存在的原子、离子或原子集团等物质质点抽象为纯粹的几何点,而完全忽略它的物质性,这样抽象出的几何点称为阵点或结点。阵点在空间周期性的规则排列称为空间点阵,空间点阵的主要特征是每个阵点在空间都具有完全相同的环境,即当我们在某个结点上向四周观察和从任何其他结点上向四周观察所见的景象完全相同。在表达空间点阵的几何形貌时,为了便于观察,用许多相互平行的直线将阵点连接起来,构成一个三维的几何格架,如图 1-1-1(a)所示,这种格架称为空间格子。

由于空间点阵中的阵点在三维空间是有规则、重复排列的,所以可在点阵中取出一个能代表阵点排列规律的基本单元,这一基本单元称为晶胞,如图 1-1-1(b)所示。将晶胞作三维的重复堆砌就构成了空间点阵。

以晶胞角上某一阵点为原点,以晶胞上过原点的三个棱为坐标轴(也叫晶轴)建立坐标系,则此晶胞就可由其三个棱边的边长 a 、 b 、 c (称为点阵常数)及晶轴之间的夹角 α 、 β 、 γ 这六个参数完全表达出来。根据晶胞的六个参数组合的可能方式,或根据晶胞自身的对称性,可将晶体分为七个晶系,如表 1-1-1 所示。

法国晶体学家布拉菲(A - Bravais)首先用数学方法确定了七个晶系中只存在 14 种空间点阵(见表 1-1-2),这 14 种空间点阵亦被称为布拉菲点阵。其晶胞如图 1-1-2 所示。

晶体虽然仅有 14 种布拉菲点阵,但由于每个阵点可以存在着一个或多个同种或异种物质质点(原子、离子、原子集团、分子),而且这些质点在阵点上的排列组合图案也可以有多种形式,所以每种空间点阵可以包括无限多种结构的晶体,如图 1-1-3 所示,其中(b)、(c)、(d)虽属于一种空间点阵,但却是三种不同结构的晶体。同样,可能存在的晶体结构是无限的,但

是各种晶体结构总能够按其原子或分子等物质质点排列的周期性和对称性归属于 14 种空间点阵中的一种。

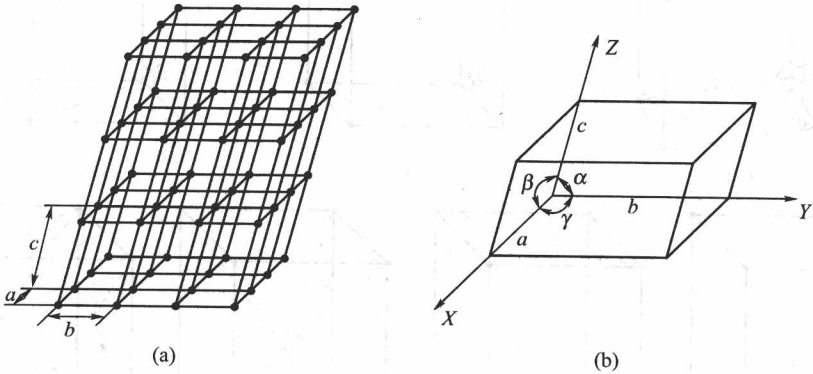


图 1-1-1 空间点阵和晶胞示意图
(a) 空间点阵; (b) 晶胞。

表 1-1-1 七个晶系

晶 系	棱边长度与夹角关系		实 例
三斜	$a \neq b \neq c,$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	$\text{Al}_{11}\text{Mn}_4, \text{AuLn}$
单斜	$a \neq b \neq c,$	$\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$	$\text{FeZn}_3, \gamma'' - \text{ZrO}_2, \text{Al}_4\text{Li}_9$
正交	$a \neq b \neq c,$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$\beta - \text{As}, \text{Fe}_3\text{C}, \text{FeB}, \text{Al}_6\text{Mn}$
六方	$a_1 = a_2 = a_3 \neq c,$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	$\text{Mg}, \text{Ti}, \text{Zn}, \text{Co}$
菱方	$a = b = c,$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	$\alpha - \text{B}, \text{Bi}, \text{Hg}, \text{Sb}$
四方	$a = b \neq c,$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$\text{In}, \beta - \text{Sn}, \text{Al}_2\text{Cu}, \text{Fe}_2\text{B}$
立方	$a = b = c,$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$\text{Fe}, \text{Cu}, \text{Al}, \text{Ni}$

表 1-1-2 布拉菲点阵

布拉菲点阵	晶 系	布拉菲点阵	晶 系
简单三斜	三斜	简单六方	六方
简单单斜	单斜	简单菱方	菱方
底心单斜		简单四方	四方
简单正交	正交	体心四方	
底心正交		简单立方	立方
体心正交		体心立方	
面心正交		面心立方	

1.1.2 晶面指数和晶向指数

晶体中连接原子、离子或分子阵点的直线所代表的方向称为晶向。晶体中由原子、离子或分子阵点所组成的平面称为晶面。

由于晶体中物质质点在三维空间的周期性有规则排列,沿不同的晶向和不同的晶面,物质质点排列的密度不同,因此晶体在各个方向上的物理、化学、力学性能存在差异,即晶体的各向异性,表 1-1-3 列举了几种金属晶体沿其不同方向测得的力学性能。为了便于研究和区别

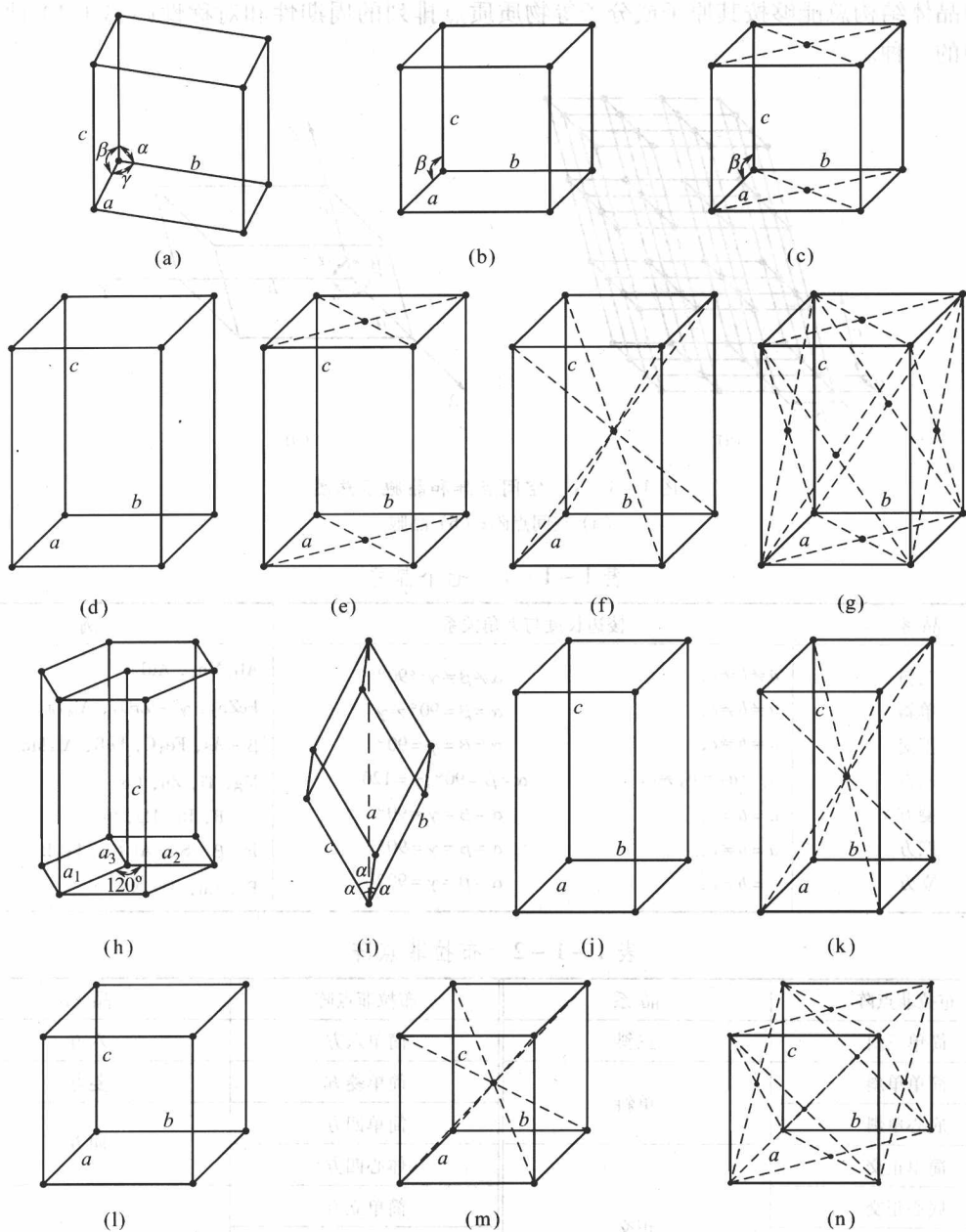


图 1-1-2 14 种布拉菲点阵的晶胞

(a) 简单三斜; (b) 简单单斜; (c) 底心单斜; (d) 简单正交; (e) 底心正交; (f) 体心正交; (g) 面心正交;
(h) 简单六方; (i) 简单菱方; (j) 简单四方; (k) 体心四方; (l) 简单立方; (m) 体心立方; (n) 面心立方。

各种晶向和晶面,需要有一个统一的规则来标志它们。这种统一的标志叫做晶向指数和晶面指数。国际上通用的是密勒 (Miller) 指数,其标注方法如下。

1. 晶向指数

晶向指数按如下步骤确定:

(1) 以晶胞的某一点阵点为原点,晶胞的三个棱边为坐标轴,并以晶胞的点阵常数 a 、 b 、 c 分别作为三个坐标轴的单位长度,如图 1-1-4 所示。

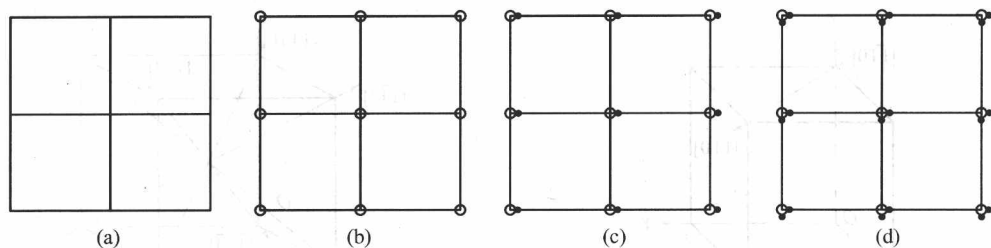


图 1-1-3 三种不同晶体结构同属一种空间点阵

表 1-1-3 单晶体的各向异性

类别	弹性模量/MPa		抗拉强度/MPa		延伸率/%	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小
Cu	191000	66700	346	128	55	10
α -Fe	293000	125000	225	158	80	20
Mg	50600	42900	840	294	220	20

(2) 过原点作一条平行于欲求晶向的直线, 求出该直线上任一结点的空间坐标值。

(3) 将求得的坐标值乘以最小公倍数并化为最小整数, 并加上方括号, 即得到晶向指数 $[uvw]$ 。如 u, v, w 中某一数为负值, 则将负号标注在该数的上方。

图 1-1-5 给出了正交点阵中几个晶向的晶向指数。

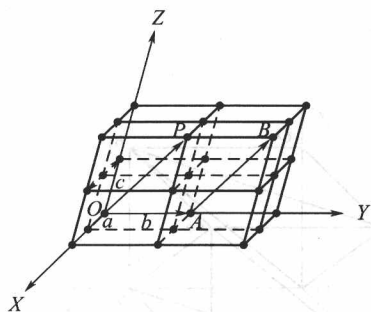


图 1-1-4 晶向指数的确定

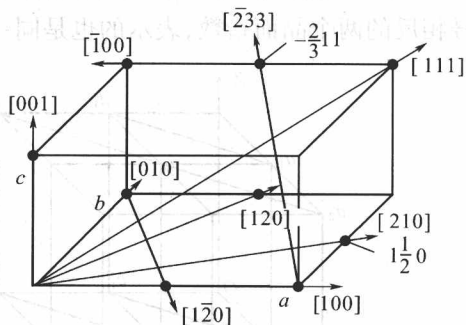


图 1-1-5 正交点阵中几个晶向的晶向指数

显然, 晶向指数表示的是一组相互平行、方向一致的晶向。若晶体中两直线相互平行但方向相反, 则晶向指数的数字相同, 但符号相反。例如 $[\bar{1}10]$ 和 $[110]$ 就是两个相互平行、方向相反的晶向, 见图 1-1-6。

晶体中因对称关系而等同的各组晶向可归并为一个晶向族, 用 $\langle uvw \rangle$ 表示。例如, 立方晶系中 $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 和 $[\bar{1}00]$ 、 $[0\bar{1}0]$ 、 $[00\bar{1}]$ 等六个晶向上的原子排列完全相同, 属 $\langle 100 \rangle$ 晶向族, 又如 $\langle 111 \rangle$ 晶向族也由八个不同的晶向构成, 如图 1-1-7 所示。

2. 晶面指数

晶面指数的确定方法如下:

(1) 在点阵中设置参考坐标系。设置方法与确定晶向指数时相同, 但不能将坐标原点选在欲确定晶面指数的晶面上。

(2) 以晶格常数 a, b, c 作为三个坐标轴上的单位长度, 求出欲定晶面在各坐标轴上的截距。

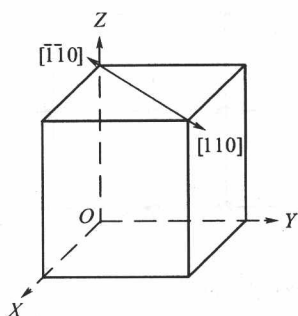


图 1-1-6 $[1\bar{1}0]$ 和 $[110]$ 晶向

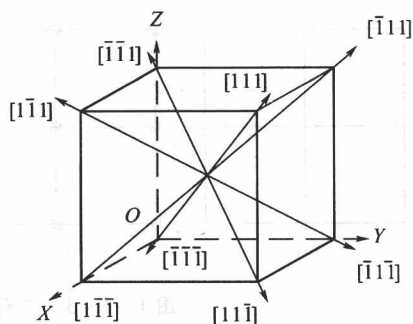


图 1-1-7 $\langle 111 \rangle$ 晶向族

(3) 求出三个截距的倒数。

(4) 将三截距的倒数化为最小整数, 并加上圆括号, 即得到晶面指数 (hkl) 。如果晶面在坐标轴上的截距为负数, 则在相应的指数上方加一负号, 如 $(1\bar{1}0)$ 、 $(11\bar{1})$ 、 $(2\bar{1}2)$ 等。

现举例说明如下:

图 1-1-8(a) 中晶面 $a_1b_1c_1d_1$ 及 $a_2b_2c_2d_2$ 为互相平行的两个晶面, 在 X 、 Y 、 Z 坐标轴上的截距分别为 1 、 1 、 ∞ 及 2 、 2 、 ∞ ; 其倒数为 1 、 1 、 0 及 $1/2$ 、 $1/2$ 、 0 ; 化为最小整数, 则两个晶面的晶面指数都是 (110) 。由此可见, 一个晶面指数表示的不仅是一个晶面, 而是一组互相平行的晶面。图 1-1-8(b) 中晶面 $a_1b_1c_1$ 与 $a_2b_2c_2$ 也是互相平行的, 如果分别选取 O 及 O' 为原点, 则截距分别为 1 、 1 、 -1 及 -1 、 -1 、 1 , 取倒数并化为最小整数, 它们的晶面指数分别为 $(11\bar{1})$ 及 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 。这两个晶面指数的数字相同而符号相反。所以, 由于原点选取不同, 得到数字相同而符号相反的两个晶面指数, 表示的也是同一组平行晶面。

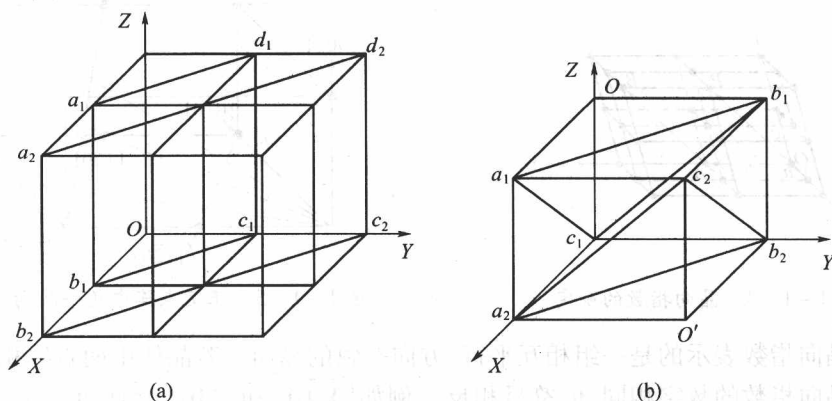


图 1-1-8 晶面指数的确定

在晶体中, 具有等同条件而只是空间位向不同的各组晶面 (即这些晶面的原子排列情况和面面间距等完全相同), 可归并为一个晶面族, 用 $\{hkl\}$ 来表示。例如, 在立方晶系中,

$$\{100\} = (100) + (010) + (001)$$

$$\{111\} = (111) + (\bar{1}\bar{1}1) + (1\bar{1}\bar{1}) + (11\bar{1})$$

$$\{110\} = (110) + (101) + (011) + (\bar{1}\bar{1}0) + (\bar{1}01) + (0\bar{1}1)$$

在立方晶系中, 具有相同指数的晶向和晶面必定相互垂直, 即 $[hkl] \perp (hkl)$, $[221] \perp (221)$, 如图 1-1-9 所示。

3. 六方晶系的晶面指数和晶向指数

对于六方晶系也可以采用上述的方法标定晶面和晶向。 a_1 、 a_2 、 c 为坐标轴, a_1 与 a_2 之间的夹角为 120° , c 轴垂直于 a_1 、 a_2 。按该方法, 六方晶系六个柱面的晶面指数应为 (100) 、 (010) 、 $(\bar{1}10)$ 、 $(\bar{1}\bar{0}0)$ 、 $(0\bar{1}0)$ 、 $(1\bar{1}0)$ 。这六个面上原子排列相同, 且所在位置也保持一定的对称关系, 属于等同晶面, 但从它们的晶面指数上却不能明确表示出来。用这种方法标定晶向指数也有类似情况, 例如 $[100]$ 和 $[110]$ 实际上是等同的晶向, 但指数上反映不出来。为了克服这一缺点, 通常采用专用于六方晶系的指数标定方法。

据六方晶系的对称特点, 采用 a_1 、 a_2 、 a_3 及 c 四个坐标轴, a_1 、 a_2 、 a_3 之间的夹角均为 120° 。晶面指数的标定方法同前面一样, 但必须用 $(hkil)$ 四个指数来表示。根据立体几何学, 在三维空间中独立的坐标轴最多不超过三个。上述方法中位于同一平面上的 h 、 k 、 i 中只有两个是独立的。可以证明, h 、 k 、 i 之间存在着下列关系:

$$i = -(h + k) \quad (1-1-1)$$

此时六个柱面的指数成为 $(10\bar{1}0)$ 、 $(01\bar{1}0)$ 、 $(\bar{1}100)$ 、 $(\bar{1}\bar{0}10)$ 、 $(0\bar{1}10)$ 和 $(1\bar{1}00)$ 。它们显示出六个晶面的等同性和对称性, 可以将它们归并为 $\{10\bar{1}0\}$ 晶面族。

采用四轴坐标时, 晶向指数的确定方法也和采用三轴坐标系时相同, 但必须用 $[uvtw]$ 四个数字来表示。同理 u 、 v 、 t 三个数中也只能有两个是独立的, 因此规定:

$$t = -(u + v) \quad (1-1-2)$$

图 1-1-10 给出六方晶系几个主要晶面和晶向的密勒指数。

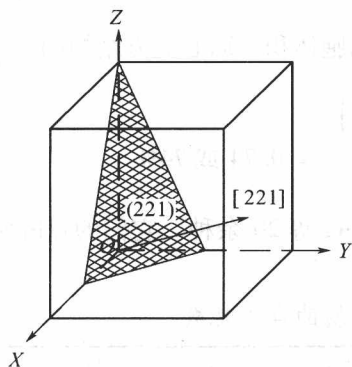


图 1-1-9 相同指数的晶向和晶面的关系

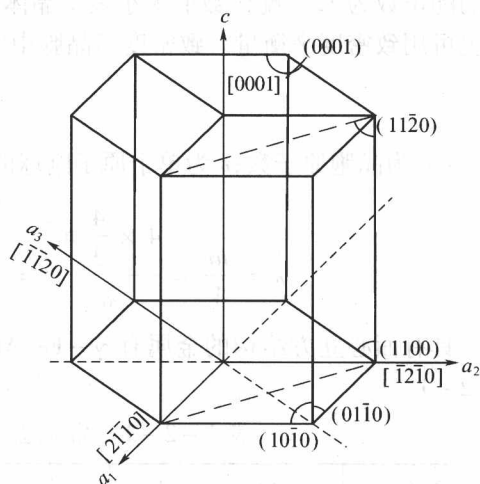


图 1-1-10 六方晶系的主要晶面指数和晶向指数

1.2 纯金属的晶体结构

金属通常都是晶体, 且绝大多数金属具有高对称性的简单结构, 最常见的典型晶体结构为: 面心立方结构 (Face-centered cubic, fcc)、体心立方结构 (Body-centered cubic, bcc)、密排六方结构 (Close-packed hexagonal, hcp)。

1.2.1 面心立方结构

面心立方结构的晶胞如图 1-2-1 所示。在晶胞的八个角上及六个面的中心各有一个原

子。每个角上的原子为相邻八个晶胞所共有；六个面的中心原子为相邻两个晶胞所共有。所以面心立方晶胞中的原子数为： $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$ 。

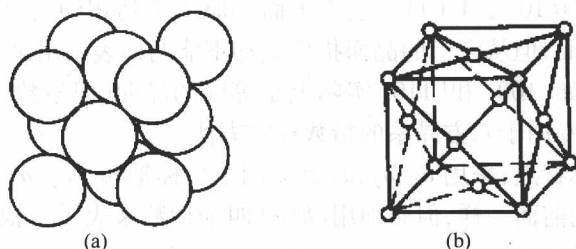


图 1-2-1 面心立方晶胞

(a) 刚球模型；(b) 质点模型。

晶胞的大小可用点阵常数来衡量。对于立方晶系，点阵常数以棱边长 a 表示。

由图 1-2-1(a) 可见，棱边上的原子并不互相接触，只有立方体面对角线上的原子彼此相切，所以原子半径 $r = \frac{\sqrt{2}}{4}a$ 。

晶体中任一原子的最近邻且等距离的原子数称为配位数，据此定义可计算出面心立方结构的配位数为 12。配位数的大小表示晶体中原子堆砌的紧密程度，晶体中原子排列的紧密程度也可用致密度来衡量。致密度指晶胞中原子所占体积与晶胞体积之比，即

$$k = \frac{nv}{V}$$

式中： n 为晶胞原子数； v 为单个原子刚球的体积； V 为晶胞体积。面心立方结构的致密度为

$$k = \frac{nv}{V} = \frac{4 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{a^3} = \frac{4 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{2}a}{4} \right)^3}{a^3} = 0.74 \text{ 或 } 74\%$$

具有面心立方结构的金属有 γ -Fe、Al、Cu、Ni、Au、Ag 等 20 余种。它们的点阵常数见表 1-2-1。

表 1-2-1 常见面心立方结构金属的点阵常数*

金属	γ -Fe	Al	Cu	Ni	Au	Ag	Pb	β -Co
点阵常数 a/nm	0.3647 (916℃)	0.4049	0.3615	0.3524	0.4079	0.4086	0.4943	0.3844
原子半径 r/nm	0.1389 (916℃)	0.1434	0.1278	0.1246	0.1442	0.1445	0.1749	0.1253

* 除注明温度外，其他均为室温数据

1.2.2 体心立方结构

体心立方结构的晶胞如图 1-2-2 所示，在体心立方晶胞中，八个角上及晶胞中心各有一个原子。因此体心立方晶胞原子数为 $\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$ 。