

工程材料 及机械制造基础

主 编 马艳萍

编 者 刘志良 高东强

陕西科学技术出版社

内 容 简 介

本书从高等院校机械制造冷加工类专业教学实际需要出发,在学校使用多年的教材基础上编写而成。在体系和内容上有较大的更新,扼要讲述金属学、金属材料及热处理方面的基本内容,同时简单介绍金属材料冷热加工基本规范。共包括:金属材料的机械性能,晶体结构与结晶,金属的塑性变形与再结晶,合金的结构与二元合金,铁碳合金,钢的热处理,合金钢,铸造,压力加工,机械零件毛坯的选择,机械加工工艺流程概论等12章。

本书可作为高等院校机械制造冷加工各专业的试用教材,亦适合机械设计和生产部门的技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料及机械制造基础/马艳萍主编. —西安:陕西科学技术出版社,2004.6
ISBN 7-5369-3813-6

I. 工... II. 马... III. ①工程材料②机械制造工艺 IV. ①TB3②TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 049449 号

出版者 陕西科学技术出版社
西安北大街131号 邮编 710003
电话(029)87211894 传真(029)87218236
<http://www.snstp.com>

发行者 陕西科学技术出版社
电话(029)87212206 87260001

印刷 陕西科技大学印刷厂

规格 787mm×1092mm 16开本

印张 14.25 印张

字数 350千字

印数 1—2000

版次 2004年6月第1版
2004年6月第1次印刷

定价 25.00元

版权所有 翻印必究

前 言

本教材为适应教学内容和课程体系改革的需要,以国家教育部工程材料及机械制造基础课程指导小组制定的《工程材料及机械制造基础教学基本要求》为依据,并结合本课程教学实践及对课程改革的经验编写而成。

本教材注意了课程内容与《金属工艺学实习教材》的密切配合,讲课与实习有机地衔接,注重实用,因此对有关的典型设备和工具的工作原理、结构和使用方法等内容不再介绍,力求加强基础理论,阐明工艺方法,突出工艺特点。做到内容循序渐进、深入浅出,形成了机械制造生产过程的整体概念。便于学生学习和掌握金属材料的分类特点、选材、选择毛坯、选择工艺方法的综合知识,使设计出的机械零件具有良好的使用性能和工艺性能,以达到为后续课程奠定基础的目的。

本教材的第8章、第9章及第10章部分内容由刘志良同志编写,第10章部分内容、第11、12章由高东强同志编写,其余各章及全书插图由马艳萍同志编写并担任主编。全书由张英莲教授负责审稿,机制教研室的许多老师也为本书的修改提出了很多好的建议,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平和经验有限,并且是对课程体系改革的探索,书中难免存在错误和不妥之处,敬请批评指正。

编 者
2004年1月

目 录

第 1 章 金属材料的机械性能	(1)
1.1 静载荷下的机械性能	(1)
1.2 动载荷下的机械性能	(2)
1.3 高温下的机械性能	(3)
1.4 金属及合金的其他性能	(4)
第 2 章 晶体结构与结晶	(5)
2.1 金属的晶体结构	(5)
2.2 金属的实际晶体结构	(11)
2.3 纯金属的结晶和铸锭	(13)
第 3 章 金属的塑性变形与再结晶	(18)
3.1 金属的塑性变形	(18)
3.2 塑性变形对组织和性能的影响	(23)
3.3 回复与再结晶	(24)
3.4 金属的热加工	(27)
第 4 章 合金的结构与二元合金	(29)
4.1 合金的相结构	(29)
4.2 二元合金相图	(34)
4.3 合金的性能与相图的关系	(44)
第 5 章 铁碳合金	(47)
5.1 铁碳合金中的基本相	(47)
5.2 Fe—Fe ₃ C 二元相图分析	(48)
5.3 碳钢	(55)
第 6 章 钢的热处理	(60)
6.1 概述	(60)
6.2 钢在加热时的转变	(60)
6.3 钢在冷却时的转变	(63)
6.4 钢的退火与正火	(71)
6.5 钢的淬火和回火	(75)
6.6 钢的表面处理	(82)
第 7 章 合金钢(工业用钢)	(89)
7.1 钢的分类及编号	(89)
7.2 合金元素在钢中的作用	(90)

7.3	合金结构钢	(93)
7.4	工具钢	(102)
7.5	特殊性能钢	(110)
7.6	材料的选用	(114)
7.7	热处理技术条件的标注	(119)
第8章	铸造	(123)
8.1	合金的铸造性能	(123)
8.2	常用铸造合金	(127)
8.3	砂型铸造	(136)
8.4	特种铸造简介	(144)
8.5	铸件结构工艺性	(149)
第9章	压力加工	(155)
9.1	金属的可锻性	(155)
9.2	自由锻造	(156)
9.3	模型锻造	(162)
9.4	板料冲压	(167)
第10章	焊接	(175)
10.1	手工电弧焊	(175)
10.2	其他焊接方法简介	(185)
10.3	常用金属材料的焊接性能	(190)
10.4	焊接结构设计	(195)
第11章	机械零件毛坯的选择	(198)
11.1	选择毛坯类型和加工方法的原则	(198)
11.2	常用毛坯制造方法的比较	(199)
11.3	常用机械零件的毛坯类别	(200)
第12章	机械加工工艺过程概论	(204)
12.1	基本概念	(204)
12.2	工件的安装和夹具	(206)
12.3	工艺规程的拟订	(208)

第 1 章 金属材料的机械性能

金属材料是现代工农业、国防和科学技术的重要物质基础,它的品种繁多,工程上常用的金属材料有钢铁、有色金属及其合金、粉末冶金材料等。由于它具有优良的机械性能及物理、化学性能,易于满足生产和生活上的各种需要,还由于它具有良好的工艺性能,易于采用各种工艺方法制成各种形状的零件及工具,因而应用非常广泛。

金属材料的性能主要是指使用性能和加工工艺性能。材料在使用条件下所表现出来的性能称为使用性能,它包括材料的物理、化学和机械性能;材料在冷、热加工过程中所表现出来的性能称为加工工艺性能,它包括铸造性能、压力加工性能、焊接性能、热处理性能、切削加工性能,等等。各种材料成分不同,性能各异,而且通过加工,特别是热处理以后,性能变化很大。

金属及合金的机械性能在这里是指力学性能而言,即受外力作用时所反映出来的性能。它是衡量金属材料的极其重要的标志。材料在各种外力作用下所表现出来的机械性能需要通过各种不同的试验来测定。

1.1 静载荷下的机械性能

静载荷是指对试样缓慢加载。最常用的是静拉伸试验和硬度试验,从这两个试验中可以得到材料的常用性能指标。

1.1.1 弹性和塑性

金属材料在外力作用下都会或多或少地产生变形。在使用金属材料时,除了变形的程度外,更值得注意的是当外力去掉后,变形能否恢复原状和恢复原状的程度,这两者反映了金属材料的弹性和塑性。

金属材料受外力作用时产生变形,当外力去掉后能恢复其原来形状的性能,叫做弹性。这种随着外力消失而消失的变形,叫做弹性变形。

金属材料在外力作用下,产生永久变形而不致引起破坏的性能,叫做塑性。在外力消失后留下来的这部分不可恢复的变形,叫做塑性变形。

金属及合金是一种既具有弹性又具有塑性的材料,其弹性和塑性的表现,常常是有条件的。在室温和一般载荷的条件下,如果外力的作用时间不太长,则某种金属及合金在作用力达到某一定值以前,变形是弹性的,超过此值,变形是塑性的。

以低碳钢拉伸曲线为例,在弹性变形范围内,符合虎克定律: $\sigma = E \cdot \epsilon$ 或 $\tau = G \cdot \nu$

弹性模量 E 是衡量材料产生弹性变形难易程度的指标。 E 越大,则使其产生一定量弹

性变形的应力也越大。因此,工程上把它叫做材料的刚度,表征材料弹性变形抗力的大小。

金属材料的塑性通常用延伸率 δ 和断面收缩率 ψ 来表示。其值愈大,则塑性愈好。良好的塑性是金属材料进行塑性加工的必要条件。

1.1.2 强度和硬度

强度是在外力作用下金属材料抵抗变形和断裂的一种性能,也就是抵抗外力而不致失效的能力。按照作用力性质的不同,可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度和抗扭强度等。在工程上常用来表示金属材料强度的指标有屈服强度和抗拉强度。

屈服强度 σ_s 是金属材料发生屈服现象时的屈服极限,以及抵抗微量塑性变形的能力。

抗拉强度 σ_b 是金属材料在拉断前所能承受的最大应力。

屈服强度和抗拉强度的数值可以根据静拉伸试验数据得到,它的大小对设计机件和选择、评定金属材料是有重要意义的。因为金属材料不能在超过其 σ_s 的条件下工作,否则会引起机件的塑性变形;金属材料也不能在超过其 σ_b 的条件下工作,否则会导致机件的破坏。

金属材料抵抗更硬的物体压入其内的能力,叫做硬度。它是材料性能的一个综合的物理量,表示金属材料在一个小的体积范围内抵抗弹性变形、塑性变形或破断的能力。

金属材料的硬度可用专门仪器来试验,常用的有布氏硬度机和洛氏硬度机。

布氏硬度机的原理是用一定直径的淬火钢球,在一定压力 P 下,将钢球垂直地压入金属材料表面,并保持压力至规定的时间后卸载,测得压痕的直径。然后根据所用压力的大小和所得压痕面积算出压痕表面所承受的平均应力值。这个应力值叫做布氏硬度,用符号 HB 表示。试验时根据压痕直径直接查表。

洛氏硬度机也是利用压力将坚硬的压头压入金属表面的原理,但它不是根据压痕的直径,而是根据压痕的深度来计算硬度。所用的压头和载荷也和布氏硬度机不同。例如,洛氏硬度机有一种压头是顶角为 120° 的金刚石圆锥,用以试验较硬的材料。这种压头在 150kg 载荷下测得的硬度值(可直接由硬度机的刻度盘上读取),叫做洛氏硬度,用符号 HRC 表示。

由于采用不同压头和载荷相配合,洛氏硬度试验还有其他的标度,如 HRA、HRB 等。HRC 洛氏硬度机以金刚石为压头,可以试验硬度很高的材料,而且压痕很小,几乎不损伤工件表面,故在钢铁热处理质量检查中应用最多。

由于硬度反映金属材料在局部范围内对塑性变形的抗力,故硬度与强度之间有一定的关系,下列经验数据可供参考:

低碳钢: $\sigma_b = 0.36HB$ 调质合金钢: $\sigma_b = 0.325HB$

高碳钢: $\sigma_b = 0.34HB$ 灰铸铁: $\sigma_b \approx 0.1HB$

1.2 动载荷下的机械性能

动载荷主要有两种形式,一种是载荷以较高的速度施加到零件上,形成冲击;另一种是载荷的大小和方向作周期性变化,形成所谓交变载荷。

1.2.1 冲击韧性

有些机器零件和工具在工作时要受到冲击作用,如蒸汽锤的锤杆、柴油机的曲轴、冲床的冲头等。由于瞬时的外力冲击作用所引起的变形和应力,比静载荷的大得多,因此,在设计受到冲击载荷的零件和工具时,必须考虑所用材料的冲击韧性。

金属材料抵抗冲击载荷的能力,叫做冲击韧性。现在常用一次摆锤冲击弯曲试验来测定金属材料的冲击韧性,即把标准冲击试样一次击断,就用试样缺口处单位截面积上的冲击功来表示冲击韧性 α_k 。

冲击值的大小与很多因素有关,不仅受试样形状、表面光洁度、内部组织等的影响,还与实验时周围温度有关。因此,冲击值一般作为选择材料的参考,不直接用于强度计算。

必须指出,在冲击载荷下工作的机器零件,很少是受大能量一次冲击破坏的,往往是受小能量多次重复冲击而破坏的。因此,在一次冲断条件下确定冲击韧性,虽然方法简便,且其冲击值对于判别金属材料抵抗大能量冲击能力方面有一定的作用,但是对于大多数在工作中承受小能量重复冲击的机件来说,就不够合适。不过,试验研究表明:在冲击能量不太大的情况下,金属材料承受多次重复冲击的能力,主要决定于强度,而不是要求过高的冲击韧性,这时强度较高而冲击韧性较低的材料寿命较长。

1.2.2 疲劳强度

在机械中还有许多零件,如曲轴、齿轮、连杆、弹簧等是在交变载荷作用下工作的。这种受交变应力的零件,发生断裂时的应力,远低于该材料的屈服强度,这种现象叫做疲劳破坏。据统计,约有 80% 的机件失效都可归咎于疲劳破坏。

金属材料在无数次重复交变载荷作用下而不致引起断裂的最大应力,叫做疲劳强度。实际上不可能进行无数次试验,故各种金属材料应有一定的应力循环基数。拿钢材来说,如应力循环次数达 10^7 次仍不发生疲劳破坏,就认为不会再发生疲劳破坏,所以钢材以 10^7 为基数。有色金属和某些超高强度钢则常取 10^8 为基数。

产生疲劳破坏的原因,一般认为是由于材料有夹杂、表面划痕及其他能引起应力集中的缺陷而导致微裂纹的产生。这种微裂纹随应力循环次数的增加逐渐扩展,致使零件不能承受所加载荷突然破坏。

为了提高零件的疲劳强度,除改善其结构形状,避免应力集中外,还可采取表面强化的方法,如提高零件表面的加工光洁度,对零件表面进行喷丸处理、表面淬火等。

1.3 高温下的机械性能

许多机械零件在高温下工作,在室温下测定的性能指标就不能代表它在高温下的性能。一般来说,随着温度的升高,弹性模量 E 、屈服强度 σ_s 、硬度等值都将降低,而塑性将会增加。除此以外,还会发生蠕变现象。

蠕变是指金属在高温长时间应力作用下,即使所加应力小于该温度下的屈服强度,也会逐渐产生明显的塑性变形直至断裂。

1.4 金属及合金的其他性能

金属及合金的主要物理性能有比重、熔点、热膨胀性、导热性和导电性等。由于机器零件的用途不同,对于其物理性能的要求也有所不同。例如,飞机零件要选用比重小的铝合金来制造;又如,在设计电机、电器的零件时,常要考虑金属材料的导电性等。

化学性能是指金属及合金在室温或高温时抵抗各种化学作用的能力,主要是指抵抗活泼介质的化学侵蚀的能力,如耐酸性、耐碱性、抗氧化性等。对于在腐蚀介质中或高温下工作的零件,比在空气中或室温下的腐蚀更为强烈。在设计这类零件时,应特别注意金属材料的化学性能,并采用化学稳定性良好的合金。

工艺性能是物理、化学、机械性能的总和。按照工艺方法的不同,又可分为铸造性、可锻性、可焊性、热处理工艺性和切削加工性等。在设计零件和选择工艺方法时,都要考虑金属材料的工艺性能。

复习及思考

1. 什么是钢材的硬度、强度、塑性、冲击韧性、疲劳强度?
2. 金属材料的机械性能指标主要有哪几项?表示的符号是什么?物理意义是什么?
3. 什么叫做应力?什么叫做应变?
4. 缩颈现象发生在拉伸图上的哪一点?如果试样没有出现缩颈现象,是否表示该试样没有塑性变形?
5. 将钟表发条拉成一直线,这是弹性变形还是塑性变形?怎样判别它的变形性质?
6. 布氏、洛氏、维氏等硬度机,用于测量硬度时各有什么优缺点?

第 2 章 晶体结构与结晶

2.1 金属的晶体结构

金属在固态下通常都是晶体,故研究金属首先就应该从了解其晶体结构开始。为此,我们需要先介绍一些有关晶体的一般概念。

2.1.1 晶体的概念

自然界存在的固体物质按其原子(更确切地说是离子)的聚集状态可分为两大类:晶体和非晶体。对于晶体,大家并不生疏。人们吃的食盐、冬天河里结的冰、天然金刚石、水晶等都是晶体,一般的固态金属及其合金也都是晶体。是否任何固态物质都是晶体呢?不是。像玻璃、松香之类就不是晶体。目前有一些特殊成分的合金,由液态激冷也可以制成非晶质金属。

晶体与非晶体的区别不在外形,而在内部的原子排列。在晶体中,原子按一定规律排列得很整齐。而在非晶体中,原子则是散乱分布着,至多有一些局部的短程规则排列。由于晶体与非晶体中原子排列不同,因此性能也不同。

晶体具有一定的熔点,非晶体则没有。在熔点以上,晶体变成液体,处于非结晶状态。在熔点以下,液体又变成晶体,处于结晶状态。熔点就是物质的结晶状态与非结晶状态互相转变的临界温度。固态非晶体则是液体在冷却时没有来得及变成晶体就凝固了,所以它实质上是一种过冷的液体。

晶体的性能在不同方向上具有不同的数值,即各向异性,而非晶体则是各向同性的。例如,体心立方的铁晶体,由于它在不同晶向上的原子密度不同,原子结合力不同,因而其弹性模量 E 便不同,在 $\langle 111 \rangle$ 方向 $E=290000\text{MN}/\text{m}^2$,在 $\langle 100 \rangle$ 方向 $E=135000\text{MN}/\text{m}^2$ 。许多晶体物质,如石膏、云母、方解石等常沿一定的晶面易于破裂,具有一定的解理面,也都是这个道理。

晶体的各向异性不论在物理、化学或机械性能方面,即不论在弹性模量、破断抗力、屈服强度或电阻率、磁导率、线胀系数,以及在酸中的溶解速度等许多方面都会表现出来,并在工业上得到了应用。如制作变压器用的硅钢片,因它在不同晶向的磁化能力不同,我们可以通过特殊的轧制工艺,使其易磁化的 $\langle 100 \rangle$ 晶向平行于轧制方向,从而得到优异的磁导率等。

总之,晶体的最大特点就是内部原子按一定规律整齐地排列着。本章研究金属的晶体结构,就是研究金属晶体内部原子排列的规律性。

2.1.2 金属的特性和金属键

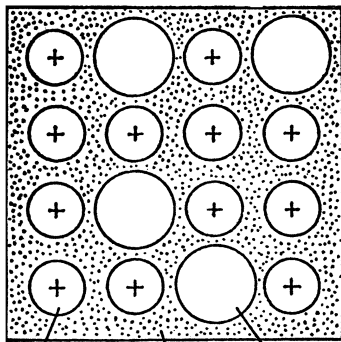
固态金属的特性主要表现在：不透明、有光泽、有延展性、良好的导电性和导热性，并且随着温度的升高，金属的导电性降低，电阻率增大，即金属具有正的电阻温度系数。而一切非金属都与此相反，随着温度的升高，非金属的电阻率减小，导电性提高。固态金属的这些特性，是由于金属原子的结构特点和金属原子结合的特点所决定的。

金属原子的结构特点是，最外电子层的电子数很少，一般只有一二个，而且这些最外层电子与原子核的结合力较弱，很容易脱离原子核的束缚变成自由电子。因此，金属原子很容易丢失外层电子变成正离子。

过渡族金属的原子结构，除了具有上述特点之外，还有一个特点，就是在次外层尚未填满电子的情况下，最外层就先填充了电子。因此，过渡族金属的原子不仅容易丢失最外层电子，还容易丢失次外层的一二个电子，这就出现过渡族金属的化合价可变的现象。当过渡族金属原子相互结合时，不仅最外层电子参与结合。而且次外层电子也参与结合，所以，过渡族金属的原子结合力特别强，宏观上就表现为过渡族金属的熔点高，强度大。

在气态金属中，原子之间距离较远，只是偶尔发生碰撞，彼此之间并不存在结合键。当金属原子互相靠近达到一定程度变成液态金属和固态金属时，原子之间就形成了结合键，使原子紧凑而规则地排列在一起。金属原子间的结合键称为金属键。

金属原子越靠近，相互作用越强，靠近到一定程度，相邻原子的最外电子层发生交叠，价电子的运动状态发生变化，原来单个原子中的每一个价电子能级，都分裂成许多个不连续的新能级，形成一个“能带”。这样一来，每个原子的价电子不再只围绕自己的原子核转动，而是在所有原子之间运动，成为“公有化”的自由电子。价电子被公有化以后的金属原子就成为正离子，而自由电子则好像一种气体充满其间，被称为“电子气”。带负电的自由电子与带正电的金属正离子之间产生静电吸引力，使金属原子结合在一起。这就是金属键的本质。



正离子 电子气 中性原子

图 2-1 金属键的模型

图 2-1 示意地绘出金属键的模型。在实际的固态金属中，并非所有的金属原子都变成了正离子，而是绝大部分处于正离子状态，还有小部分仍处于中性原子状态，并且金属原子的这种状态也是在不断地变化的。

了解了金属键的本质，就可以比较深刻地理解固态

金属的一些特性。

2.1.3 典型的金属晶体结构

晶体中原子排列的具体情况称为晶体结构。图 2-2(a) 绘出原子在空间堆积的球体模型，可以看出，原子在各个方向上的排列都是规则的。为了清楚地表明原子在空间排列的规律，有必要将原子抽象化，把每个原子看成一个点，这个点代表原子的振动中心。这样，原子在空间堆积的球体模型变成一个规则排列的空间点阵，把这些点用直线连接起来，就形成一个空间格子，称为晶格（见图 2-2(b)）。显然，点阵和晶格都是晶体中原子规则排列的抽

象化。

晶格中的每个点称为结点,结点代表原子在晶体中的平衡位置。在晶格中,结点的分布具有周期性的规律,因此,每个结点都具有完全相同的周围邻点,这是晶格的一个重要特点。

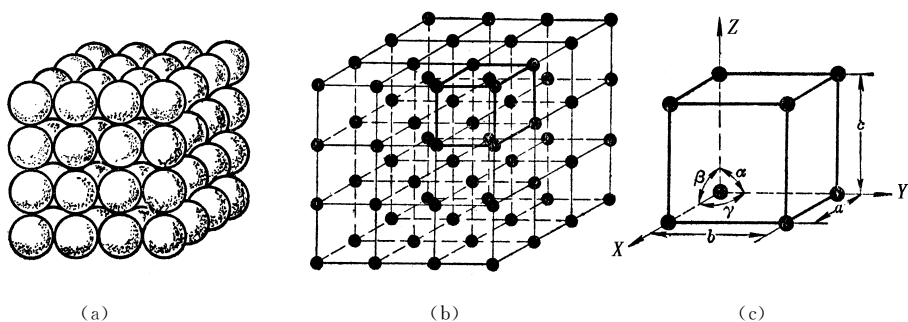


图 2-2 简单立方晶体(a)、晶格(b)及晶胞(c)的示意图

由于晶格具有周期性特点,因此,可以从晶格中取出一个有代表性的结构单元来研究,称为晶胞(图 2-2(c))。可以认为,整个晶格就是由晶胞在空间的重复堆垛形成。晶胞的各边尺寸 a, b, c 叫“晶格常数”,其大小常以 \AA (埃)为计量单位($1\text{\AA}=1\times 10^{-8}\text{cm}$);晶胞各边之间的相互夹角常分别以 α, β, γ 表示。

在已知的 80 余种金属元素中,除少数十几种具有复杂的晶体结构外,大多数金属都具有比较简单的晶体结构。其中,最典型、最常见的金属晶体结构为以下三种密排的晶格形式:

2.1.3.1 体心立方晶格(Body centred cubic)

体心立方晶胞如图 2-3 所示,是由 8 个原子构成的立方体,在立方体的体心位置还有 1 个原子。因其晶格常数 $a=b=c$,故通常只用一个常数 a 来表示。由图可见,在晶胞的体对角线方向,原子相互接触地排列着,相邻原子的中心距恰好等于原子直径。所以,体心立方晶胞中原子半径 $r=\frac{\sqrt{3}}{4}a$ 。在这种晶胞中,因每个顶点上的原子是同时属于周围 8 个晶胞所共有,故实际上每个体心立方晶胞中仅含有: $8\times\frac{1}{8}+1=2$ 个原子。

晶胞中原子排列的紧密程度,可以用两个参数来反映:一个是配位数,一个是致密度。在晶体中,每个原子周围都有完全相同的近邻原子。配位数就是每个原子周围的最近邻原子数。显然,配位数越大,原子排列得越紧密。体心立方晶格可以看成是由两个简单晶格穿插排列而成。在每个体心立方晶胞中,无论是体心的原子,还是角上的原子,周围都有 8 个最近邻原子,所以配位数是 8。由于原子是球体,所以,即使是一个挨一个最紧密地排列着,原子之间仍有空隙,不可能把空间完全填满。原子排列得越紧密,填满的程度就越大。致密度就是晶胞中原子所占体积和晶胞体积之比。体心立方晶胞的致密度 ≈ 0.68 。

已知有 20 余种金属具有体心立方晶格。纯铁在 912°C (1185K)以下的温度就具有体心立方晶格,称为 $\alpha\text{-Fe}$ 。此外,最常见的体心立方晶格金属还有 $\alpha\text{-Cr}, \beta\text{-Ti}, \text{V}, \text{Nb}, \text{Mo}, \text{W}$ 等。

2.1.3.2 面心立方晶格(Face centred cubic)

面心立方晶胞如图 2-4 所示,在晶胞的 8 个角上各有一个原子,构成立方体,在立方体

的 6 个面的中心各有一个原子,所以叫做面心立方晶胞。每个面心立方晶胞中的原子数是 $8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4$ 个原子。

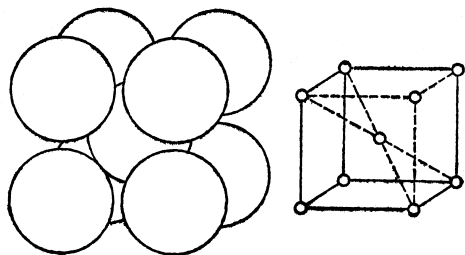


图 2-3 体心立方晶胞

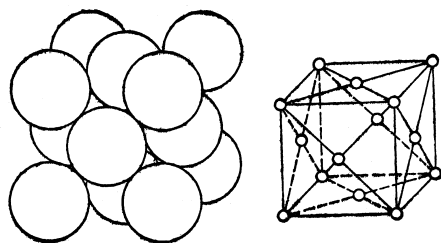


图 2-4 面心立方晶胞

沿着晶胞的面对角线方向,原子相互接触地排列着,相邻原子的中心距恰好等于原子直径。所以,面心立方晶胞中原子半径 $r = \frac{\sqrt{2}}{4}a$ 。由此可以算出,面心立方晶胞的致密度约等于 0.74。在晶胞中每个原子周围都有 12 个最近邻原子,所以,其配位数是 12。

由配位致密度可以看出,面心立方晶格比体心立方晶格更致密。实际上,面心立方晶格是原子最紧密的排列方式,而体心立方晶格是原子次紧密的排列方式。

已知有 20 余种金属具有面心立方晶格。纯铁在 $912 \sim 1394^\circ\text{C}$ ($1185 \sim 1667\text{K}$) 温度区间内就具有面心立方晶格,称为 $\gamma\text{-Fe}$ 。此外,最常见的面心立方晶格金属还有 Cu、Al、Ag、Au、Ni、 $\beta\text{-Co}$ 、 $\gamma\text{-Mn}$ 等。

2.1.3.3 密排六方晶格(Hexagonal close packed structure)

密排六方晶格如图 2-5 所示。在晶胞的 12 个角上各有一个原子,构成六方柱体。上下底面中心各有一个原子,晶胞内部还有 3 个原子,所以叫做密排六方晶胞。由图可见,每个角上的原子属于 6 个晶胞共有,上下底面中心的原子属于 2 个晶胞共有,内部 3 个原子完全属于这个晶胞,所以,每个密排六方晶胞中的原子数是

$$12 \times \frac{1}{6} + 2 \times \frac{1}{2} + 3 = 6 \text{ 个原子。}$$

密排六方晶格的晶格常数有两个:一个是正六边形底面的边长 a ,另一个是上下底面的距离

(晶胞高度) c 。 c 与 a 之比 c/a 称为轴比。对于典型的密排六方晶格,轴比 $c/a = \sqrt{\frac{8}{3}} \approx 1.633$ 。但是,实际的密排六方晶格金属,其轴比都或大或小地偏离这一理论值,大约在 $1.57 \sim 1.64$ 之间波动。

已知有三十余种金属具有密排六方晶格。最常见的密排六方晶格金属有 Be、Mg、Zn 等。关于这三种典型金属晶格的数据列于表 2-1。

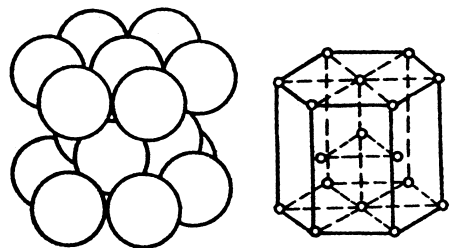


图 2-5 密排六方晶胞

表 2-1

三种典型金属晶格的数据

晶格类型	晶胞中原子数	原子半径	配位数	致密度
体心立方	2	$\frac{\sqrt{3}}{4}a$	8	0.68
面心立方	4	$\frac{\sqrt{2}}{4}a$	12	0.74
密排六方	6	$\frac{1}{2}a$	12	0.74

2.1.4 晶向指数和晶面指数

为了确定原子列和原子面在晶体中的位向,分别采用晶向指数和晶面指数来描述。

2.1.4.1 晶向指数(Miller indices of directions)

在晶格中,穿过两个以上结点的任一直线,都代表晶体中一个原子列在空间的位向,称为晶向。每个晶向在晶胞中的位置和指向,用晶向指数来表示。在立方晶胞中,确定晶向指数的方法如下:

假设图 2-6 中的 \vec{AB} 为待定的晶向,从坐标原点 O 引 \vec{AB} 的平行线,交顶面与 C 点。 C 点的坐标是 $1/2, 1/2, 1$, 按比例化为最小整数则为 $1, 1, 2$, 放在方括号 $[\]$ 内,即为所求的晶向指数 $[112]$ 。

总结起来,确定晶向指数的方法如下:

- ① 确定坐标系和坐标长度单位,一般以晶胞的三个晶轴为坐标系,以点阵常数为坐标长度单位;
- ② 在晶胞中,从坐标原点引一直线,平行于待定的晶向;
- ③ 在所引直线上任取一点,求出该点的三个坐标值;
- ④ 将三个坐标值按比例化为最小整数,放在方括号内,即为所求的晶向指数。

在立方晶胞中,通常以 $[uvw]$ 作为晶向指数的通式。晶向指数所表示的不仅仅是某一条直线的位向,而是同时反应了一组平行线的位向。只要是同向平行的晶向,都具有相同的晶向指数。异向平行的晶向,其晶向指数数字相同,负号相反。

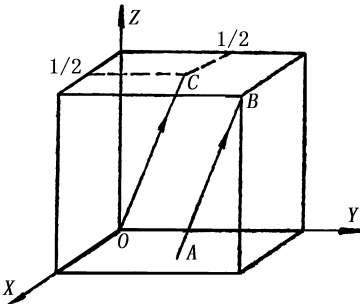


图 2-6 确定晶向指数的示意图

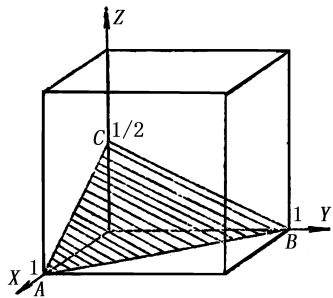


图 2-7 确定晶面指数的示意图

另外,在一种晶格中,如果某些晶向,虽然它们的位向不同,但各晶向中的原子排列相同时,如 $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 等,这时若无必要予以区别,则可以把这些晶向统用 $\langle 100 \rangle$ 来表示。换句话说,即 $[uvw]$ 表示某一确定位向的晶向指数,而 $\langle uvw \rangle$ 则可以指那些位向不同,而原子排列相同的一族晶向。

2.1.4.2 晶面指数(Miller indices of planes)

晶体中各种方位上的原子面叫晶面,确定晶面指数的方法如下(图 2-7):

①确定坐标系和坐标长度单位,一般以晶胞的三个晶轴为坐标系,以点阵常数为坐标长度单位;

②求出晶面在三个坐标轴上的截距;

③取晶面截距的倒数;

④将三个倒数值按比例化为最小整数,放在圆括号内,即为所求的晶面指数。

在立方晶胞中,通常以 (hkl) 作为晶面指数的通式。晶面指数并非仅表示某一个晶面,而是代表一组平行的晶面。而且,在立方晶胞中,由于对称性很高,所以有些晶面虽然空间位向不同,但原子排列的方式相同,在一些过程中的表现也相同,这些晶面就归为一个晶面族,通用 $\{hkl\}$ 来表示晶面族指数。

在立方晶胞中,若一个晶向垂直于某一晶面,则此晶向指数与此晶面指数的数字、顺序、符号完全相同。反过来说,若一个晶向指数与一个晶面指数数字完全相同,则此晶向必垂直于此晶面。

当一个晶向位于(或平行于)某一晶面中时,此晶向指数 $[uvw]$ 与此晶面指数 (hkl) 之间必定满足以下关系: $hu+kv+lw=0$ 。

2.1.5 晶面及晶向的原子密度

表 2-2 体心立方晶格中各主要晶面和晶向的原子密度

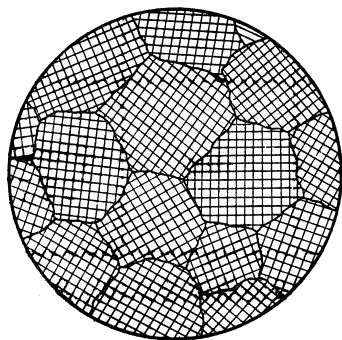
晶面指数	晶面示意图	晶面密度 (原子数/面积)	晶向指数	晶向密度 (原子数/长度)
$\{100\}$		$\frac{1}{4} \times 4 = \frac{1}{a^2}$	$\langle 100 \rangle$	$\frac{1}{2} \times 2 = \frac{1}{a}$
$\{110\}$		$\frac{1}{4} \times 4 + 1 = \frac{1.4}{\sqrt{2}a^2}$	$\langle 110 \rangle$	$\frac{1}{2} \times 2 = \frac{0.7}{\sqrt{2}a}$
$\{111\}$		$\frac{1}{6} \times 3 = \frac{0.58}{\sqrt{3}a^2}$	$\langle 111 \rangle$	$\frac{1}{2} \times 2 + 1 = \frac{1.16}{\sqrt{3}a}$

所谓某晶面的原子密度即指其单位面积中的原子数,而晶向原子密度则指其单位长度上的原子数。在各种晶格中,不同晶面和晶向上的原子密度都是不同的。体心立方晶格中各主要晶面和晶向上的原子密度见表 2-2。由表可见,在体心立方晶格中,具有最大原子密度的晶面是 $\{110\}$,具有最大原子密度的晶向是 $\langle 111 \rangle$ 。

2.2 金属的实际晶体结构

2.2.1 多晶体结构

如果一块晶体,其内部的晶格位向完全一致时,我们称这块晶体为“单晶体”。在以上的讨论中,我们指的都是这种单晶体中的情况。但在工业金属材料中,除非专门制作,则都不是这样,即使是在一块很小的金属中也包含着许许多多的小晶体,如图 2-8 所示。由于其中每个小晶体的外形多为不规则的颗粒状,因而通常把它们叫做“晶粒”。晶粒与晶粒之间的界面叫晶粒间界,或简称为“晶界”。显然,晶界处的原子排列,为了适应两晶粒间不同晶界位向的过渡,总是不规则的。这种实际上由多晶粒组成的晶体结构称为“多晶体”结构。如上所述,工业纯铁的弹性模量等性能之所以表现不出像在单晶体中那样的各向异性,就是因为其中各晶粒的位向不同,结果只表现出它们的平均性能。



(a) 多晶体结构示意图



(b) 显微组织照片

图 2-8 金属多晶体结构

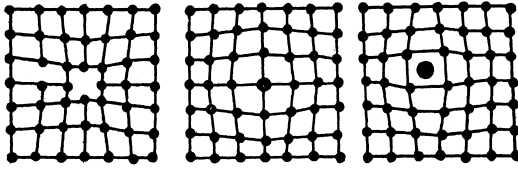
晶粒的尺寸,在钢铁材料中,一般在 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ mm 左右,故必须在显微镜下才能看见。在显微镜下所观察到的金属中的各种晶粒的大小、形态和分布叫做“显微组织”。有色金属,如铜、铝、锡、铅、锌等的晶粒一般都比钢铁的大些,有时甚至不用显微镜就能直接看见。如,镀锌钢板表面的锌晶粒,其尺寸通常达数毫米至十几毫米。

在每个晶粒的内部,实际上也不是那么理想,即每个晶粒内部的晶格位向在不同区域上还有微小的差别,一般仅 $10' \sim 20'$ 左右,最多 $1^\circ \sim 2^\circ$,这些在晶格位向上彼此有微小差别的晶内小区域叫做“亚晶”或“嵌镶块”,其尺寸较小,通常需在高倍显微镜或电子显微镜下才能观察到。

2.2.2 晶格缺陷

前面所讲的晶体结构都是理想晶体的结构。然而,实际存在的任何一块金属,内部都存在着不完整性,即原子的排列都不是完美无缺的。实际金属中原子排列的不完整性称为晶体缺陷。晶体缺陷有多种,按其几何形态可以分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三种。

2.2.2.1 点缺陷(Point defects)



(a)晶格空位 (b)置换原子 (c)间隙原子

图 2-9 点缺陷示意图

常见的点缺陷有三种,就是空位、间隙原子和置换原子,如图 2-9。

当晶格中某些原子由于某种原因(如热振动的偶然偏差等)脱离了本身结点位置而转移到晶格间隙时就会造成空位和间隙原子。如果有半径较大的异类原子进入金属晶体,占据了原来基体原子的平衡位置,则称为置换原子。这些点缺陷的存在,会使其周围的晶格发生畸变。

2.2.2.2 线缺陷——位错(dislocation)

晶体中的线缺陷就是位错。位错有各种类型,其中最简单也是最基本的有两种:刃型位错和螺型位错,如图 2-10。

所谓位错可以看作是晶格中一部分晶体相对于另一部分晶体做局部滑移所造成的结果。晶体中已滑移部分和未滑移部分在滑移面上的交界线即为位错线。

金属晶体中的位错线往往大量存在,相互缠结呈网状分布,密度通常在 $10^4 \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 范围内。

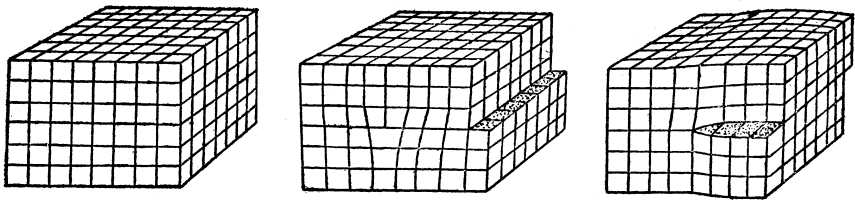


图 2-10 线缺陷示意图

2.2.2.3 面缺陷

晶体中的面缺陷包括晶体的外表面和内表面,即晶体内部的晶界、亚晶界、相界面等。

晶界的结构和性能取决于相邻晶粒位向差的大小。位向差小于 15° 时,称为小角度晶界;位向差大于 15° 时,称为大角度晶界。一般地说,位向差越大,则晶界厚度越大,界面能也越高。实验证明,小角度晶界是由一系列位错排列而成的。图 2-11(b)是最简单的小角度晶界的“位错墙”模型,它由一系列刃型位错垂直堆积而成。

关于大角度晶界,一般认为具有过渡点阵结构,晶界上的原子处于两边晶格的折中位置,由一边晶格位向逐渐过渡到另一边晶格位向,如图 2-11(a)。

通过上述讨论可见,凡晶格缺陷处及其附近均有明显的晶格畸变,因而会引起体系能量的提高,并使金属的物理、化学和机械性能发生显著的变化。