

高等学校试用教材

工程材料

余寿彭 主编

东南大学出版社

高等学校试用教材

工 程 材 料

余寿彭 主编

赠 书

东南大学出版社

工 程 材 料

余寿彭 主编

东南大学出版社出版发行

南京四牌楼2号

武汉工学院印刷厂印刷

开本787×1092毫米1/16 14 $\frac{3}{16}$ 印张 字数 350千字

1989年11月第1版 1989年11月第1次印刷

印数: 1—2200册

ISBN 7—81023—258—4

TG.1

定价3.72元

前 言

本教材是根据国家教委“材料及机械制造基础”课程教学指导小组，于1986年制订四年制机械类专业《工程材料》课的教学基本要求，并结合我们多年来讲授《金属材料及热处理》课的教学实践编写的。

本教材共分三篇十二章，内容主要包括：

第一篇 金属及合金的组织结构：有金属机械性能、金属的结构与缺陷和合金结构及显微组织等章组成。主要说明材料的性能取决于内部组织结构；

第二篇 金属及合金的转变原理及控制：有纯金属的结晶、合金的结晶与相图、金属的塑性变形与再结晶，钢的热处理以及金属材料的强化等章组成。主要说明改变材料的性能关键在于改变金属的组织结构；

第三篇 机械工程材料及其选用：有黑色金属材料、有色金属材料、非金属材料以及材料的选用等章组成。主要是介绍材料的种类及性能，以及改变性能的工艺方法，从而达到正确地选择和使用材料。

几点说明：（1）本课程应安排在学过物理、化学及力学等课程，并完成“金工”教学实习后进行。（2）教材内容是按50学时左右编写的。同时也考虑到职工大学，大学专科等机械类专业选用。（3）考虑到学时和专业的要求，对《工程材料》的体系和内容作了改革，突出材料知识和选择材料能力的培养。（4）编写时，注意到用新工艺和新材料充实教材的内容。（5）本教材的计算单位采用国际单位制，若选用资料是从“国标”（GB）中摘出的，而“国标”计量单位尚未变动时，则沿用原计量单位，它们之间换算关系为：强度指标 $0.1\text{kgf/mm}^2 \approx 1\text{MN/m}^2$ ；冲击韧性指标 $0.1\text{kgfm/cm}^2 \approx 1\text{J/cm}^2$ ；硬度值单位不变，一般不予标注。

本教材由余寿彭同志任主编，并参加编写绪论、第三篇第九、十一章，浦珠还同志参加编写第一篇第一、二、三章和第二篇中第四、五章；陈曦同志参加编写第二篇第六、七、八章和第三篇中第十、十二章。本书由蒋伯诚同志主审。

由于我们水平有限，编写时虽然在教材体系和内容上作了一些探索性尝试，但由于经验不足，考虑不周，安排欠妥，缺点和错误在所难免，恳切希望广大读者提出宝贵意见，以便改进。

者1989年11月于武汉工学院

绪 论

《工程材料》课是研究与机械材料有关的成份、工艺、组织与性能相互之间关系的一门技术基础课。是机械类各专业的必修课。

人类社会的进步与材料的发展息息相关。我们常常谈论的石器时代、青铜器时代、铁器时代和合成材料时代，正是以人们所用的主要材料来作为划分历史的界碑。材料的发展水平在很大的程度上决定了许多工业技术的发展步伐，决定了人类的生活方式，因而对经济和社会的发展产生重大的影响。可以这么说，材料与材料技术的发展和突破，不断地把人类的文明推向更高的层次，我们今天的生活水准在很大程度上得益于人类历史上新材料的不断发现，我们将来的繁荣也将在很大程度上依赖今天对材料的研究硕果。新材料对社会发展的巨大推动作用，已引起了当今各国政府和有识之士的极大关注，无疑我国对新材料的研制兴趣也正与日俱增。

材料品种繁多，分类的方法各异，人们习惯上把材料分为金属材料、非金属材料及其复合材料；若按材料的用途又可分结构材料和功能材料。

目前机械工业发展非常迅速，在机械产品不断更新换代，特别是材料科学迅猛的发展，新材料和新工艺不断出现，如何合理选择和正确使用金属材料、非金属材料 and 复合材料，以及妥善安排其加工工艺过程，对充分发挥材料本身潜力，获得理想的使用性能，节省材料，降低成本，提高产品和零件的质量等方面起着重大的影响。在实际工作中，往往由于选材不当，工艺安排不妥，使材料的使用性能达不到规定的技术要求，造成很大的浪费或产品质量降低等。因此，一个合格的机械工程技术人员必须要具备有关材料方面的基础知识。

在机械工程材料中，金属材料是主体。据统计，目前各种机器设备、车辆等所用的材料中，金属材料约占90%左右。

金属材料之所以能获得广泛的应用，不仅由于它的资源丰富，而且还由于它具有许多独特的优良的使用性能（机械性能、物理性能、化学性能）以及加工工艺性能。同时，通过改变金属材料化学成分，采用恰当的冷、热加工工艺，可改变其组织获得相应的性能，从而可以进一步发挥材料固有的潜在功能，扩大其使用范围。

随着现代科学技术的飞跃进展，非金属材料得到快速的发展，其中尤以人工合成高分子材料（如塑料）的发展更快，几乎每四、五年世界产量就要翻一番，并且性能不断地提高，新的品种也不断地出现，应用已遍及国民经济的各个领域。这说明工程塑料已成为应用前景非常广阔的一种新兴工程材料。在本课程中应当引起足够的重视。

无机非金属材料中作为结构材料的陶瓷发展也很快，其中有高强度陶瓷、高温陶瓷、高韧性陶瓷、耐酸陶瓷等，在国防、机械、化工等工业部门发挥了独特的作用。

非金属材料与金属材料相比，有其明显的特点，如耐高温、耐腐蚀、绝缘、减震、质轻、成型加工容易、生产率高和成本低等，故非金属材料在工业上的应用日益广泛，有些机器的金属零部件，已逐渐被非金属材料制品所代替。当然，非金属材料的某些机械性能目前尚不

如金属材料,有待进一步研究和提高。但是,近几年人工合成纤维材料研究成功,人们制出了增强塑料的复合材料,如玻璃钢等。利用金属材料和非金属材料在性能上各自特点,取长补短,制成各种复合材料,从而改善和提高了非金属材料的机械性能,扩大了其应用范围。

我国是世界上历史最悠久的文明古国之一,我们祖先在材料方面同样为人类作出过突出的贡献,如陶瓷(瓷器)、冶炼技术、合金配制、热处理等。

根据历史的记载和文物考古证明,距今约3000年前,我国劳动人民已经掌握了冶炼铜、锡、铅技术;春秋战国时代,我们已发明了锡青铜、炼钢和淬火等技术。如《周礼·考工》和《天工开物》等文献中,对合金成分配制、热处理的淬火、退火、渗碳以及金属加工工艺等都有较详细的记载。

我国古代劳动人民在材料及工艺等方面,就已取得了很高的成就。但由于封建社会制度阻碍了劳动人民的智慧和创造性的发挥,特别是近百年来帝国主义的侵略和压迫,以及半封建、半殖民地的反动统治,使解放前我国的工业与科学技术处于极为落后的状态。

建国以来,由于重视科学技术的发展,结束了我国科学技术长期停滞不前的局面,各个部门、各条战线都得到较快的发展。材料工业为了有力地支援国家的建设,为了适应机器制造业的需要,钢铁生产已由1949年的年产量15.8万吨发展到目前6000万吨左右。并且根据我国的具体情况,制订并完善了钢铁等金属的新标准,同时建立了符合本国资源的合金钢体系。新钢种和新材料也日益在发展。在热处理技术方面,新技术新工艺新设备不断出现和应用,对保证质量和促进材料性能的提高,进一步扩大其应用范围具有较大的影响。

随着科学技术的飞速发展,非金属材料和复合材料也得到重视和发展。可以预言,二十一世纪非金属材料和复合材料将更多的代替金属材料,对此我们必须引起高度的重视。

为了适应近代科学技术的发展需要,本教材除了重点介绍金属材料之外,还扼要介绍了高分子材料的基础知识以及塑料、陶瓷和复合材料的结构、性能和用途。

机械工程材料是材料科学的实用部分,机械类各专业学习本课程目的,在于使学生获得有关机械工程材料的基本理论、基本知识,并一般了解材料分析的基本方法;了解常用机械工程材料的成分、工艺、组织、性能之间的关系;具有根据机械零件的工作条件和性能要求,合理选用机械工程材料的初步能力。

本课程的特点是在讲授内容中,概念多、术语多;另外课程中没有多少公式和定律,却有许多定性的描述等。开始学习时你可能会感到不习惯,由于不能马上理解和掌握它们之间的内在联系,而觉得内容“杂乱”。这些问题的解决,主要是根据课程特点和性质,注意改进学习方法,应把重点放在注意听讲和及时复习,并经常进行阶段小结,找出内在联系,切勿前松后紧,以免给后续的学习内容增加难度。另外本课程有较强的工业背景,如能联系教学实习中遇到的问题来学,并注意理论联系实际,那一定大有裨益。

为了进一步培养学生分析问题和独立工作能力,除课堂讲授外,还安排必要的实验、习题和课堂讨论等教学环节,以提高教学效果。

目 录

绪论	(1)
----	-------

第一篇 金属及合金的组织结构

第一章 金属及合金的主要性能	(1)
第一节 金属及合金的机械性能	(1)
第二节 金属及合金的物理、化学性能及工艺性能	(5)
第二章 金属的结构与缺陷	(6)
第一节 金属的晶体结构	(6)
第二节 晶体学知识	(9)
第三节 实际金属晶体的结构及晶体缺陷	(11)
第三章 合金的相结构和显微组织	(15)
第一节 概述	(15)
第二节 合金的相结构	(15)
第三节 合金的显微组织	(20)

第二篇 金属及合金的转变原理及控制

第四章 纯金属的结晶	(21)
第一节 结晶的现象与规律	(21)
第二节 铸锭及焊缝组织	(27)
第三节 金属的同素异晶转变	(8)
第五章 合金的结晶与相图	(30)
第一节 二元合金的结晶与相图	(30)
第二节 铁碳合金的结晶与相图	(39)
第六章 金属的塑性变形与再结晶	(52)
第一节 金属的塑性变形	(52)
第二节 冷塑变形对金属组织和性能的影响	(56)
第三节 冷变形金属在加热时的组织和性能变化	(59)
第四节 金属的热变形加工	(63)
第七章 钢的热处理	(65)
第一节 概述	(65)
第二节 钢的热处理原理	(66)

第三节 钢的热处理工艺.....	(82)
第八章 金属材料的强化	(104)
第一节 金属材料的强化途径.....	(104)
第二节 金属材料的强化方式.....	(105)

第三篇 常用机械工程材料及其选用

第九章 黑色金属材料	(108)
第一节 钢铁的冶炼.....	(108)
第二节 合金元素在钢中的作用.....	(115)
第三节 结构钢.....	(119)
第四节 工具钢.....	(133)
第五节 特殊性能钢.....	(142)
第六节 铸铁.....	(147)
第十章 有色金属及其合金	(159)
第一节 铝及铝合金.....	(159)
第二节 铜及铜合金.....	(166)
第三节 滑动轴承合金.....	(171)
第十一章 非金属材料	(174)
第一节 高分子材料的基础知识.....	(174)
第二节 工程塑料.....	(179)
第三节 陶瓷材料.....	(186)
第四节 复合材料.....	(190)
第十二章 机械零件材料的选用	(195)
第一节 材料选用的一般原则.....	(195)
第二节 热处理技术条件的制定.....	(197)
第三节 金属材料的切削加工性.....	(201)
第四节 机械零件的失效与材料性能的关系.....	(202)
第五节 典型零件的选材.....	(204)

第一篇 金属及合金的组织结构

第一章 金属及合金的主要性能

用来制造机器零件的金属及合金应具有优良的使用性能及工艺性能。所谓使用性能，是指机器零件在正常工作情况下金属材料应具备的性能，它包括机械性能、物理和化学性能。而工艺性能是指零件的冷、热加工制造过程中，金属材料应具备与加工工艺相适应的性能。

第一节 金属及合金的机械性能

所谓机械性能，是指零件在载荷作用下所反映出来的抵抗变形或断裂的性能（或称之为力学性能）。机械性能指标是零件的设计计算、选材、工艺评定以及材料检验的主要依据。由于外加载荷性质不同（例如拉伸、压缩、扭转、冲击及循环载荷等），对金属材料要求的机械性能指标也将不同，常用的机械性能包括：弹性、塑性、强度、冲击韧性及疲劳强度等。

一、弹性、塑性及强度

金属材料受外力作用时产生变形，当外力去掉后能恢复到原来形状及尺寸的性能叫做弹性。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破裂的性能叫塑性。在外力去掉后保留下来的这部分永久变形叫做塑性变形。

金属材料在外力作用下抵抗破坏（过量的塑性变形或断裂）的性能叫做强度。由于外力的作用方式有拉伸、压缩、弯曲、剪切等形式，所以强度也分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度及抗剪强度等。

上述的弹性、塑性及抗拉强度等机械性能指标，可以通过静拉伸试验而求得。在室温下将标准试样放在拉伸试验机上，在试样两端施加轴向静拉力 P ，使试样沿轴向伸长直至断裂为止。拉伸试验机上的自动记录装置把作用在试样上的力 P 和所引起的绝对伸长量 Δl 记录下来，自动绘出载荷与伸长量的关系曲线——拉伸图。图1-1是退火低碳钢拉伸图，由于拉伸图上的载荷 P 与绝对伸长量 Δl 不仅与试验的材料有关，还与试样的尺寸有关。为了消除试样尺寸的影响，使拉伸曲线能反映金属材料的机械性能，用试样原始横截面积 F_0 去除拉力 P ，得到试样所受的拉应力 σ ，即 $\sigma = \frac{P}{F_0} \text{ MN/m}^2$ 。以试样的原始标距长度 l_0 去除绝对伸长量 Δl ，

得到试样的相对伸长（应变） ϵ ，即 $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \%$ 。以 σ 与 ϵ 为坐标绘出 σ - ϵ 的关系曲线叫做应力—应变曲线。见图1-2。

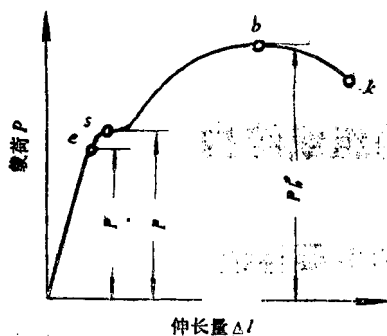


图1-1 退火低碳钢拉伸图

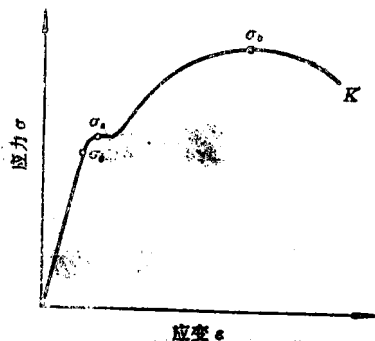


图1-2 应力—应变曲线

在应力—应变曲线上可以直接读出金属材料的静载机械性能指标，如弹性极限 σ_s ，屈服极限 σ_s ，抗拉强度 σ_b 等等。

弹性极限 σ_s 是材料产生完全弹性变形时所能承受的最大应力值，也即材料由弹性变形过渡到弹—塑性变形时微量塑性变形抗力。

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} \text{ MN/m}^2$$

生产中几乎所有弹性元件在工作中都不允许产生塑性变形，只允许在弹性范围内工作，因此 σ_s 就成为这些零件材料的失效抗力指标，它可作为弹性元件设计与选材的重要依据。

弹性模量 E 是指金属材料在弹性状态下应力与应变的比值，即 $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ 。因此在应力—应变曲线上，弹性模量 E 就是弹性变形阶段直线段的斜率，它表示金属材料抵抗弹性变形的能力。弹性模量 E 值愈大，材料产生单位弹性变形时的变形抗力也愈大。许多零件（如镗床的镗杆、机床主轴、刀架等）在一定的载荷下工作时，只允许产生一定量的弹性变形，即刚度要大。若变形量超过允许的弹性变形量时，该零件就会发生弹性失稳。因而对该类零件的刚度都有一定的要求。提高零件刚度的办法，除了增加零件横截面积或改变其截面形状外，从金属材料性能考虑，就必须增加其弹性模量 E ，但 E 是一个较稳定的机械性能指标，它主要决定于各种金属材料的本性，而热处理、微量合金化、冷热加工、加载速度等对其影响很小，故选材时应选 E 值大的材料。一般钢在室温下的 E 值在 $1.9 \times 10^5 \sim 2.2 \times 10^5 \text{ MN/m}^2$ 范围内。

屈服极限 σ_s 。在应力—应变曲线上，当应力增加到 s 点时，曲线出现水平线段，在此阶段内，应力虽然没有增加，但试样仍然继续产生塑性变形，这种现象叫做屈服， s 点叫屈服点，它是金属材料从弹性状态转向塑性状态的标志。屈服时的应力叫做材料的屈服极限，用 σ_s 表示。

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} \text{ MN/m}^2$$

σ_s 是表征材料对开始塑性变形的抗力指标，一般机件的失效并不是在完全破断时，而往往是在产生少量塑性变形后，使得零件精度降低或与其它零件的相互配合受到影响时便认为失效，所以 σ_s 就成为零件设计与选材的主要依据，同时它也是评定金属材料的重要机械性能指标。 σ_s 对金属材料的成分、组织状态很敏感，因此可以通过合金化、热处理、冷热加工等

手段来使之显著改变。

由于在金属材料中，除退火或热轧的低碳钢和中碳钢等材料有屈服现象外，大多数金属材料在拉伸试验中都没有明显的屈服现象发生。因此，规定试样在拉伸过程中标距长度范围内产生0.2%塑性变形时的应力值，作为屈服强度，以 $\sigma_{0.2}$ 表示。

抗拉强度 σ_b 。它为金属材料在拉断前所能承受的最大应力，以 σ_b 表示。

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0} \text{ MN/m}^2$$

对塑性材料来说，在 P_b 以前试样为均匀变形，试样各部分的伸长基本上是一样的，在 P_b 以后，变形将集中于试样的某一部分，该处发生集中变形而出现“缩颈”现象。所以 σ_b 的物理意义是表征材料对最大均匀变形的抗力， σ_b 是作为零件因断裂而失效的设计依据，也是金属材料的重要机械性能指标。影响 σ_b 的因素与影响 σ_s 的相同，故通过热处理是提高零件强度的必要手段。

塑性指标。工程上常用延伸率 δ 和断面收缩率 ψ 来作为材料塑性的指标。

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\%$$

$$\psi = \frac{F_0 - F}{F_0} \times 100\%$$

式中 l_0 ——试样原始标距长度

l ——试样拉断后标距长度

F_0 ——试样原始横截面积

F ——试样拉断处的横截面积

δ 或 ψ 愈大，表示材料的塑性愈好。良好的塑性是金属材料进行塑性加工的必要条件。此外，在工件使用过程中偶然过载时，由于能产生一定的塑性变形而不致突然断裂。同时在工件的应力集中处，塑性能起着削弱应力峰值（即局部最大应力）的作用，从而保证工件不致早期断裂。因而大多数工件除要求高强度外，还要求具有一定的塑性。

二、硬度

硬度是衡量金属材料软硬程度的指标。目前常用的测定硬度的方法为压入法。它是用一定几何形状的压头在一定载荷作用下，压入被测试材料表面，根据被压入的程度来测定其硬度值。所以硬度值的物理意义是金属材料表面抵抗局部压入塑性变形的能力。材料的硬度愈高，在摩擦时被磨损量愈小，材料的耐磨性便愈高。由于硬度值的高低与材料的塑性变形抗力大小有关，材料的强度愈高，塑性变形抗力愈高，硬度值也就愈高。所以有时通过硬度的测定，便可判断材料的强度。因而硬度测试已成为检验产品质量必不可少的手段之一。也是设计图纸上的技术参数之一。

常用的硬度指标有：布氏硬度（HB）及洛氏硬度（HRA、HRB、HRC）。

布氏硬度测定原理乃是用一定大小的载荷将一定直径的淬火钢球压入被测金属表面，保持一定时间后卸载，根据载荷 P 和压痕的表面积 F 求出应力值作为布氏硬度值，其符号用HB表示。习惯上布氏硬度值不标出单位，例如 $HB = 100 \text{ kgf/mm}^2$ 就写成HB100。布氏硬度试验通常用于测定各种退火状态下的钢材、铸铁、有色金属等的硬度。

洛氏硬度测定原理是以测量压痕深度为硬度的计量指标。由于采用了不同的压头及载荷，因而来测量从极软到极硬的金属材料的硬度。洛氏硬度的三种标度(HRA、HRB、HRC)中，常用的是HRC洛氏硬度，它采用金刚石圆锥体做压头，可用来测硬度很高的材料，如淬火钢、调质钢等。

布氏硬度与洛氏硬度可以按经验关系互相进行对照，具体换算可查有关手册。

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。按照下列经验公式可以根据材料的布氏硬度值来大致估算其抗拉强度：

$$\text{低碳钢} \quad \sigma_s = 0.36 \text{Hb}$$

$$\text{高碳钢} \quad \sigma_s = 0.34 \text{HB}$$

$$\text{调质合金钢} \quad \sigma_s = 0.325 \text{HB}$$

三、冲击韧性

许多机器零件和工具在工作过程中往往会受到冲击载荷的作用，由于冲击载荷的加载速度高，使得整个材料的均匀塑性变形来不及进行，塑性变形比较集中地产生于某些局部区域，因而应力分布也是不均匀的。当原材料的冶金质量或热加工后的产品质量有缺陷时，在冲击载荷作用下，便出现因韧性下降而脆断的现象。金属材料抵抗冲击载荷作用而不破坏的能力叫做冲击韧性。

工程技术上为评定金属材料抗冲击载荷的能力，常采用带缺口的冲击试样进行一次摆锤冲击弯曲试验，测得将试样击断时所消耗的功——冲击功 A_k （焦耳）， A_k 的大小就代表了材料韧性的高低。

用试样断口处的截面积去除冲击功便得冲击韧性值 α_k （焦耳/厘米²）。 α_k 值越大，表示材料韧性越好，在受冲击时不易断裂。金属材料 α_k 值仅可用于选材时作为对比参考，但不能直接用于强度计算。因为在冲击载荷下工作的机器零件，很少遭受一次大能量冲击而破坏，而常常是承受小能量多次重复冲击而破坏的。实践表明，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，主要决定于其强度，而不必片面追求过高的冲击韧性 α_k 。

金属材料承受多次重复冲击的能力，以其试样在一定冲击能量作用下，出现裂纹或最后断裂时的冲击次数来评定。

四、疲劳强度

很多机械零件，如各种轴、齿轮、连杆、弹簧等，是在交变载荷的作用下工作的。这种重复交变载荷，使金属材料发生断裂时的应力，远低于该材料的屈服强度，这种现象叫金属的疲劳。当金属在“无数次”（对钢铁来说约为 $10^6 \sim 10^7$ 次）重复交变载荷作用下而不发生断裂时的最大应力，称为疲劳强度，用以衡量金属材料疲劳破坏的能力。应力循环对称时的疲劳强度用符号 σ_{-1} 表示。

产生疲劳破坏的原因，一般是认为材料有夹杂、表面划痕及其它能引起应力集中的缺陷，在应力作用下诱发微裂纹，它随应力循环次数的增加而逐渐扩展，致使零件不能承受所加载荷，在未达预计使用寿命前就突然断裂。

由于疲劳强度对材料的表面质量及内部缺陷很敏感，所以提高材料疲劳抗力的途径为：改善零件结构形状，避免应力集中，提高零件表面加工光洁度，尽可能减少各种热处理缺陷。

(如脱碳、氧化、淬火裂纹等);采用表面强化处理(表面热处理或表面喷丸、滚压等)使零件表层产生残余压应力,从而能提高零件的疲劳抗力。

第二节 金属及合金的物理、化学性能及工艺性能

一、物理性能

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。用于不同场合下的机器零件,对于所用材料的物理性能要求是不一样的,例如飞机制造中,要求材料比重小,以减轻结构自重,故选用比重小的铝镁合金来制造。制造换热器的金属材料要求具有良好的导热能力,故选用导热性良好的铜或铝合金来制造。制造电机、电器零件时,则要考虑材料的导电性问题。

金属材料的一些物理性能对于热加工工艺也有一定的影响,例如合金钢导热性较差,如果在热处理加热过程不当时,则会引起零件翘曲变形甚至开裂。

二、化学性能

金属材料在室温或高温时抵抗各种化学作用的能力即为化学性能。如耐酸性、耐碱性、抗氧化性等。制造化工容器、医疗器械可采用不锈钢来制造。

三、工艺性能

金属材料的工艺性能乃是指材料对于相应加工工艺适应的性能。按加工工艺方法的不同,有铸造性、可锻性、可焊性、切削加工性及热处理性等。零件设计在选材时,一定要考虑到在选定的加工工艺方法下,该材料的相应工艺性能是否良好,否则便不选用它,而换用另一种材料或另一种加工工艺。

第二章 金属的结构与缺陷

第一节 金属的晶体结构

一、晶体的概念

(一) 晶体与非晶体

固态物质可以分为晶体与非晶体两类。它们之间的区别在于其内部原子聚集状况的不同，晶体内部原子按一定几何规律排列，而非晶体内部原子紊乱地分布，这就是晶体与非晶体的根本区别。食盐、金刚石、水晶、纯金属及其合金等皆为晶体物质，松香、玻璃、硬橡胶、赛璐珞等皆为非晶体物质。正因为晶体与非晶体内部原子聚集状况不同，两者的性能特点也不同，例如晶体物质具有一定的熔点，且在不同方向上性能也不相同——各向异性，而非晶体物质则相反，没有一定的熔点以及各向同性。

(二) 金属晶体的特性

金属晶体具有：不透明，有光泽，有良好的导电性、导热性及一定的塑性，尤其是具有正的电阻温度系数。

固态金属的这些特性是由于金属原子结构特点和固态下金属原子间结合方式的特点所决定的。

金属原子的结构特点是：最外层电子（价电子）数很少，一般只有1~2个，且与原子核的结合力较弱，很易摆脱原子核的束缚而变成自由电子，因而金属原子很易丢失其外层电子而变成为正离子。当金属原子互相靠近到一定程度，相邻原子最外电子层发生交叠，每个

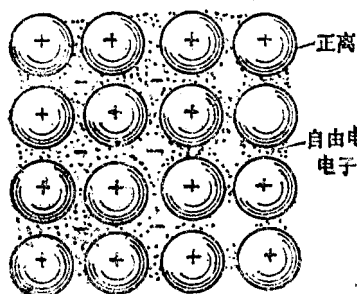


图2-1 金属键示意图

原子的价电子不再只是围绕自己的原子核转动，而在所有原子间运动，形成公有化的自由电子，价电子被公有化以后的金属原子便成为正离子，自由电子在各离子间作高速运动，好似气体一般充满各离子之间，故叫做电子气或电子云。见图2-1。

电子云与各离子间的引力使金属原子被坚强地结合起来，而离子之间及电子之间的斥力与上述引力相平衡，便使金属原子处于按一定几何规律，简单而紧密地排列而形成稳定的晶体状态。把金属原子的这种结合方式称为金属键，并由此而决定了金属晶体具有高的导电、导热性及可塑性等固有特性。

二、晶格与晶胞

为了便于研究原子在晶体内重复排列的规律性，可以近似地把原子看成静止的小球按一定几何规律在空间有规律地堆砌在一起，从而得到描述晶体结构的球体模型。见图2-2a。但这种模型虽然形象直观，可是其内部原子排列的规律性还是看不清楚，为此便把代表各个原子的刚球抽象地缩小成为一个点，其位置在球心上。再用一些假想的直线将各个点连接起来，

便构成描述晶体内原子排列规律性的空间格架——晶格。见图2-2b。晶格内各个结点，便是原子的振动中心，这种模型具有表面及内部都能看清原子排列规律性的优点。可是整个晶格模型中由于点、线太多，研究起来还不太方便，根据晶体内原子作周期性排列的这一特点，可以从晶格中取出一个能完全反映晶格特征的最小单元体来研究。这种具有代表性的最基本的几何单元体称为晶胞。见图2-2c。整个晶格就是由许多大小、形状、位向相同的晶胞在空间按一定规律重复堆砌而成的。

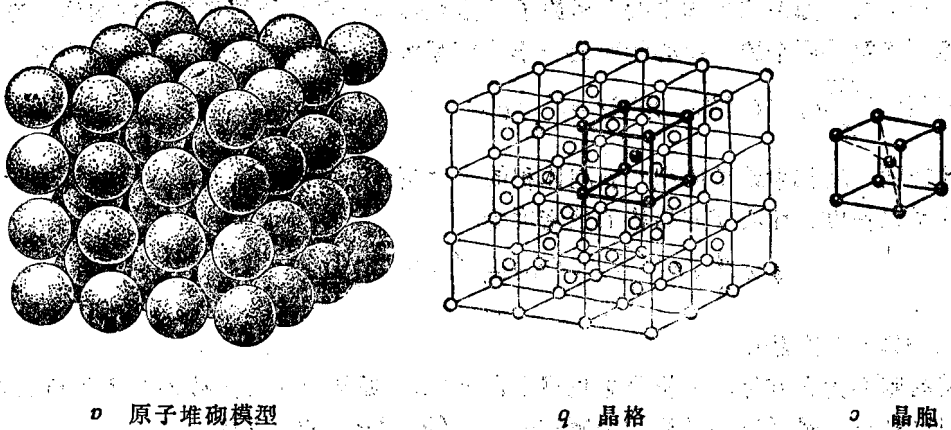


图2-2 晶体中原子排列示意图

晶胞的大小和形状以晶胞棱边长度 a 、 b 、 c 及棱边夹角 α 、 β 、 γ 来表示。见图2-3。棱边长度 a 、 b 、 c 称为晶格常数，单位为埃（ $1\text{\AA}=10^{-8}\text{cm}$ ），棱边夹角 α 、 β 、 γ 的单位为度

三、典型的金属晶格

金属元素中最常见的晶体结构有面心立方结构、体心立方结构及密排六方结构三种。以下分别介绍这三种典型的金属晶体结构。

（一）面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞为三个相邻的棱边的长度皆相等（ $a=b=c$ ）、三个相邻的棱边互相垂直（ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ ）的立方体。原子位于立方体的八个顶角上和六个面的中心。见图2-4。

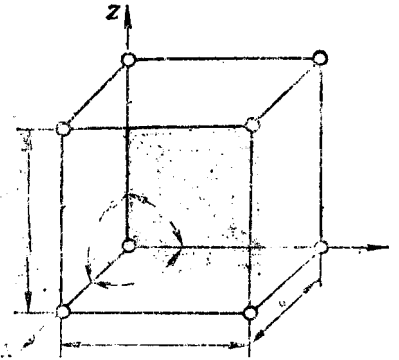


图2-3 晶胞的表示方法

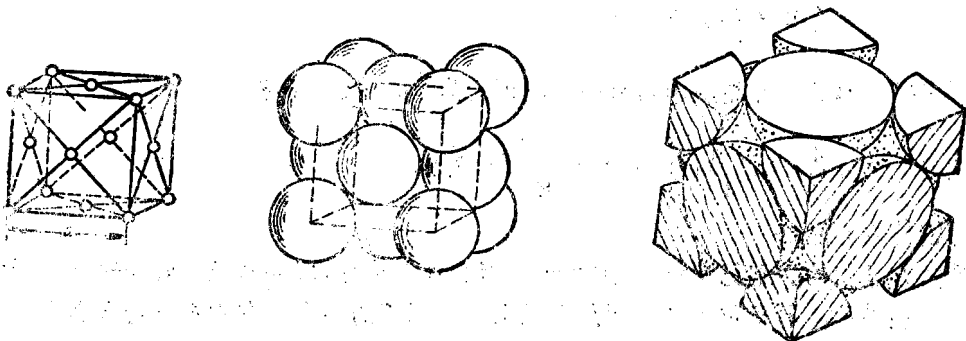


图2-4 面心立方晶胞

晶格常数只需用 a 表示即可,属于这种晶格类型的金属有 γ -Fe、Al、Cu、Ni、Pb等。

晶胞的原子数 面心立方晶格的一个晶胞中,每个顶角上的原子为相邻的八个晶胞所共有,故每个顶角上原子只有 $\frac{1}{8}$ 属于该晶胞所有。而每一个面心原子为相邻两个晶胞所共有,故每个晶面上的面心原子只有 $\frac{1}{2}$ 属于该晶胞所有。所以面心立方晶胞中的原子数为

$$(8 \times \frac{1}{8}) + (6 \times \frac{1}{2}) = 4$$

原子半径 如果将晶体中的金属原子看作是具有一定直径的刚性圆球的话,则原子半径即为相互接触的两个原子中心距离的一半(即紧邻原子间距的一半)。面心立方晶胞中紧邻原子间距为 $\frac{\sqrt{2}}{2}a$,故其原子半径 $r = \frac{\sqrt{2}}{4}a$ 。

致密度 晶胞中原子体积与晶胞体积的比值叫该晶格的致密度,它反映了原子在晶体中排列的紧密程度。面心立方晶格的致密度为

$$4 \times \frac{4}{3}\pi (\frac{\sqrt{2}}{4}a)^3 / a^3 = \frac{\sqrt{2}}{6}\pi = 0.74$$

(二)体心立方晶格

其晶胞亦为立方体,晶格常数也只需用 a 表示,原子位于立方体的八个顶角上和立方体中心。见图2-5。属于这类晶格的金属有 α -Fe、Cr、Mo、W、V等。

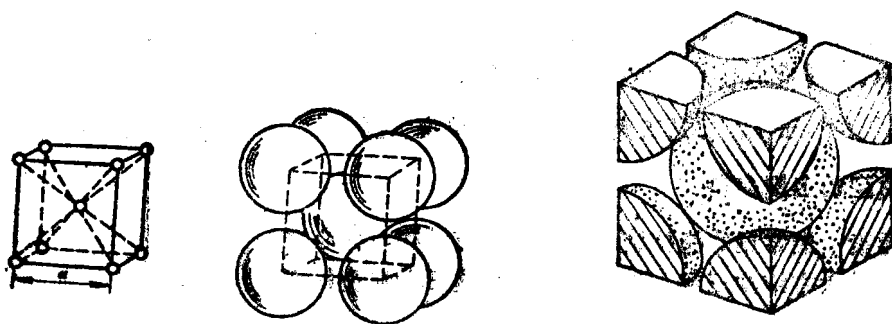


图2-5 体心立方晶胞

晶胞的原子数 顶角上的原子属于一个晶胞所有的只有 $\frac{1}{8}$,立方体中心的原子全为这个晶胞所有。故体心立方晶胞中的原子数为

$$(8 \times \frac{1}{8}) + 1 = 2$$

原子半径 体心立方晶胞中紧邻原子间距为 $\frac{\sqrt{3}}{2}a$,故原子半径 $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$ 。

致密度 $2 \times \frac{4}{3}\pi (\frac{\sqrt{3}}{4}a)^3 / a^3 = \frac{\sqrt{3}}{8}\pi = 0.68$

(三)密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞见图2-6,上、下底面为正六边形,底面边长为 a , c 轴垂直于底面,构成一个六棱柱体,原子位于12个顶角上及上、下底面的中心,在六棱柱内还有三个原子。其晶格常数必须用 a 、 c 两个数值来表示,其晶格常数比值 $c/a \approx 1.633$ 。属于这种晶格类型的

金属有Be、Mg、Zn、Cd等。

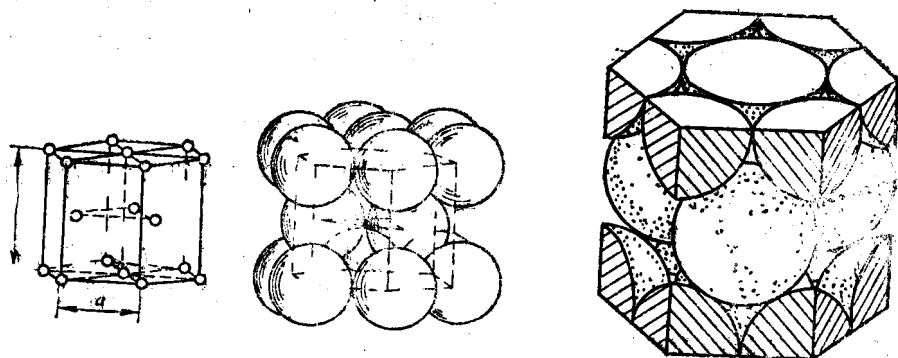


图2-6 密排六方晶胞

密排六方晶胞中的原子数为6，原子半径为 $\frac{1}{2}a$ ，致密度为0.74。

第二节 晶体学知识

晶体中原子排列的规律性也可以从晶面和晶向上的排列规律反映出来，特别是晶体中某些特殊晶面和晶向对晶体中发生的许多重要的过程，如塑性变形、晶格转变、晶体长大等起着重要作用。为便于研究和描述不同晶面和晶向上原子排列情况与特征，需要给予各种晶面及晶向以一定的符号，以表示它们在晶体中的方位或方向。这种符号叫晶面指数及晶向指数。

一、立方晶格的晶面指数

在晶格中由一系列原子所构成的平面称为晶面。对于立方晶格，求晶面指数的步骤如下（以图2-7中画有阴影线晶面为例）：

(1) 设坐标 在晶格中以晶胞的三个互相垂直的棱边为参考坐标轴 x 、 y 、 z 。为防止出现零截距，坐标原点应位于待定晶面以外。

(2) 求截距 以晶格常数为度量单位，求出该晶面在各坐标轴上的截距分别为1，2， ∞ 。

(3) 取倒数 其目的是为了晶面指数中出现 ∞ ，该面截距的倒数分别为1， $\frac{1}{2}$ ，0。

(4) 按比例化为最小整数 上例为2，1，0。

(5) 放于圆括号内 将所得各整数依次连续放于圆括号内即得该晶面的晶面指数(2 1 0)。

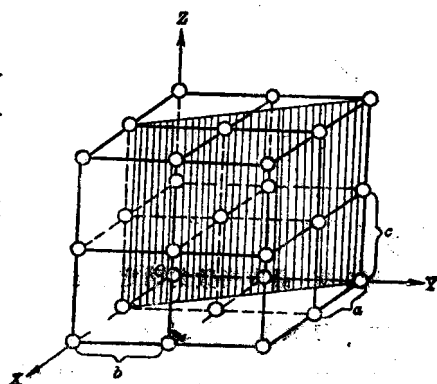


图2-7 晶面指数的确定方法

图2-8为立方晶格中三种重要的晶面：(100)，(110)，(111)。