

金属材料及热处理 学习指导书

侯玉山 李俊才 主编

机械工业出版社

金属材料及热处理学习指导书

侯玉山 主编
李俊才



机械工业出版社

本书是与赵忠主编的《金属材料及热处理》职工大学教材相配套使用的学习指导书。书中系统地介绍了教材中各章的学习要求、重点和难点，对主要内容作了扼要的提示和解释，对书中部分思考题和习题作了提示性解答。并据大纲要求，对有关章节补充了课堂讨论内容和组织方法，并增加了必要的例题或补充题。书后的附录“非金属材料”，可作为补充教材或由学生自学。

本书可作为职大、业大等机械类及近机类专业学生学习《金属材料及热处理》的辅导教材，也可供教师组织教学使用。

金属材料及热处理学习指导书

侯玉山 主编
李俊才

*

责任编辑：董连仁

封面设计：刘代

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张 7·字数 169千字

1988年10月北京第一版·1988年10月北京第一次印刷

印数 0,001—8,000·定价：2.30元

*

ISBN 7-111-00037-4/TG·21

编写说明

本书是根据原教育部 1983 年 11 月审订的职工高等工业专科学校机械类专业《金属材料及热处理教学大纲》编写的。是一本与赵忠主编的《金属材料及热处理》教材配套使用的学习指导书。

编写本书的目的是：帮助在职大、业大中从事机械类专业《金属材料及热处理》教学的教师，尤其是青年教师按照大纲组织教学，对学生学习和掌握本课程的主要内容提供指导，对解决目前教学中普遍存在的内容量与学时的矛盾，提高学生自学和分析问题的能力上有所帮助。本书如能达到上述目的，将使编者感到莫大的欣慰。

全书章节与教材中的编排顺序相同。考虑到本课程的教改和发展，增写了“非金属材料”作为附录，可供各校作为补充教材试用或由学生自学。

本书第一章、第二章由北京二七机车厂职工大学李俊才编写，第三章由沈阳黎明工学院侯玉山编写，第四章由济南市职工工业大学李金文编写，第五章由长春第一汽车制造厂职工大学张温林编写，第六章由营口市职工大学李学琛编写，第七章由天津工人业余技术大学崔志信编写，第八章由沈阳第一机床厂职工大学韩成志编写，第九章由广州业余大学黄福炽编写，第十章由齐齐哈尔第一机床厂职工机电学院张德祥编写，附录由上海第二工业大学孔令桐、龚桂初、王伊萍编写。

全书由侯玉山、李俊才统稿主编。

沈阳飞机制造公司工学院赵忠副教授自始至终对本书的编写进行了具体细致的指导，并担任主审。

中国机械工程学会职工高等教育学会工程材料专业委员会，及其前身全国职工大学（业余）工程材料教学研究会，对编写本书给予了大力支持和帮助。曾先后在沈阳、成都、长春多次会议上讨论过编写本书的必要性，广泛征求各校意见，进行多方面的调查和准备，统一思想。没有这些有力的支持和帮助，本书是不会问世的。

济南市职工工业大学姚德良、成都量具刃具厂职工大学冯金远、青岛四方机车厂职工大学高葆工、大连起重机厂职工大学陈镜清、东北机器制造厂职工大学贺宝玉、沈阳五三工厂职工大学刘元瑞、沈阳汽车制造厂职工大学王郁年、沈阳有色冶金机械总厂职工大学李萍等审阅了本书初稿，并提出许多宝贵的意见。

在此，对他们一并表示衷心的感谢。

编写本课程这种类型的学习指导书是初次尝试，由于编者教学经验和知识水平有限，加上时间仓促，书中难免会有不少缺点错误，恳请广大教师和读者不吝指正。

编者

1987 年 3 月

目 录

第一章 金属的机械性能	1	一、学习目的和要求	26
一、学习目的和要求	1	二、重点和难点	26
二、重点和难点	1	三、学习方法	26
三、学习方法	1	四、内容提要 and 解释	26
四、内容提要 and 解释	1	(一) 合金中的相结构	26
(一) 强度	1	(二) 二元合金相图	28
(二) 塑性	2	(三) 相图与合金性能的关系	32
(三) 冲击韧性	3	五、思考题和习题提示	34
(四) 硬度	3	第五章 铁碳相图和碳钢	36
(五) 疲劳强度和断裂韧性	4	一、学习目的和要求	36
五、思考题和习题提示	6	二、重点和难点	36
六、补充题	7	三、学习方法	36
第二章 金属的结构和结晶	9	四、内容提要 and 解释	36
一、学习目的和要求	9	(一) 铁碳合金中的基本组织	36
二、重点和难点	9	(二) Fe-Fe ₃ C 相图的绘制	37
三、学习方法	9	(三) Fe-Fe ₃ C 相图分析	38
四、内容提要 and 解释	9	(四) 例题	41
(一) 金属和金属键	9	(五) Fe-Fe ₃ C 相图课堂讨论	44
(二) 金属的晶体结构	9	(六) 碳钢的分类、编号、性能和用途	44
(三) 纯金属的结晶	11	五、思考题和习题提示	46
(四) 金属铸锭的组织	11	第六章 钢的热处理	48
(五) 应掌握的几个基本概念	12	一、学习目的和要求	48
五、思考题和习题提示	12	二、重点和难点	48
第三章 金属的塑性变形与再结晶	15	三、学习方法	48
一、学习目的和要求	15	四、内容提要 and 解释	48
二、重点和难点	15	(一) 概述	48
三、学习方法	15	(二) 钢的热处理原理	49
四、内容提要 and 解释	15	(三) 钢的热处理工艺	52
(一) 金属塑性变形的实质和方式	16	(四) 钢的热处理课堂讨论	55
(二) 塑性变形对金属组织和性能的影响	19	五、思考题和习题提示	56
(三) 回复和再结晶	20	第七章 合金钢	61
(四) 金属的冷加工和热加工	22	一、学习目的和要求	61
五、思考题和习题提示	22	二、重点和难点	61
第四章 合金的结构和结晶	26	三、学习方法	61
		四、内容提要 and 解释	61

(一) 钢的合金化.....	61	(二) 材料的选择.....	85
(二) 合金结构钢.....	62	(三) 热处理工艺性能与零件设计的 关系.....	87
(三) 合金工具钢.....	64	(四) 热处理方案的选择和技术条件 的标注.....	88
(四) 特殊性能钢.....	66	(五) 工艺路线的合理安排.....	89
五、思考题和习题提示.....	69	(六) 选材和热处理工艺路线课堂讨论.....	90
第八章 铸铁	71	五、思考题和习题提示.....	90
一、学习目的和要求.....	71	附录 非金属材料	92
二、重点和难点.....	71	一、高分子化合物的基本概念.....	92
三、学习方法.....	71	(一) 高分子化合物的组成.....	92
四、内容提要 and 解释.....	71	(二) 高分子材料的人工合成方法.....	93
(一) 铸铁的分类和组织特征.....	71	(三) 大分子链的几何结构.....	93
(二) 铸铁的石墨化过程及影响因素.....	72	(四) 大分子的聚集态结构.....	94
(三) 铸铁的性能和用途.....	73	(五) 线型无定型高聚物的力学状态.....	95
(四) 铸铁的热处理.....	74	(六) 聚合物的老化和防老.....	95
五、思考题和习题提示.....	75	二、工程塑料.....	96
第九章 有色金属	78	(一) 塑料的组成.....	96
一、学习目的和要求.....	78	(二) 塑料的分类.....	97
二、重点和难点.....	78	(三) 工程塑料的特性.....	97
三、学习方法.....	78	(四) 常用工程塑料.....	97
四、内容提要 and 解释.....	78	三、橡胶材料.....	99
(一) 铝及铝合金.....	78	(一) 橡胶的组成.....	99
(二) 铜及铜合金.....	80	(二) 橡胶的特性.....	100
(三) 轴承合金.....	80	(三) 常用橡胶材料.....	100
(四) 铍及钛合金.....	80	四、陶瓷.....	102
五、思考题和习题提示.....	82	(一) 陶瓷的组织结构.....	102
第十章 机械零件选材及热处理工艺 的应用	84	(二) 陶瓷的性能.....	102
一、学习目的和要求.....	84	(三) 常用陶瓷材料.....	103
二、重点和难点.....	84	五、复合材料.....	103
三、学习方法.....	84	(一) 复合材料的基本概念.....	103
四、内容提要 and 解释.....	84	(二) 纤维增强复合材料.....	105
(一) 机械零件的失效形式.....	84	(三) 层合复合材料.....	107

第一章 金属的机械性能

一、学习目的和要求

学习本章的目的, 在于了解机械性能的物理意义, 熟悉金属主要的机械性能指标, 以便在设计机械时, 根据零件的技术要求选用材料, 或在编制金属加工工艺时参考。

学完本章后, 要求在掌握概念的基础上, 熟悉有关术语、符号意义及应用场合, 并了解测定方法。

二、重点和难点

学习重点是几种常用的机械性能, 例如强度、塑性、韧性和硬度的概念及应用; 难点是疲劳强度和断裂韧性的概念及应用。

三、学习方法

本章的特点是介绍机理性内容较少, 名词概念较多, 并且实践性强, 所以学习本章一定要联系实际。

1. 联系各项机械性能指标的测定方法, 以加深对概念的理解和记忆。
2. 联系本企业产品, 分析一二种机械零件的机械性能指标及其对切削效率和质量的影响, 以灵活运用概念。
3. 针对机械零件常见的失效方式, 分析是由哪种性能不足引起的, 以加深理解零件材料的机械性能对机器正常运转所起的保证作用。

四、内容提要 and 解释

金属材料的机械性能, 是指材料受不同外力时所表现出来的特性, 这种特性是机器安全运转的保证。所以机械性能是设计机械时强度计算和选用材料的基本依据, 是评价材料质量和工艺强化水平的重要参数。常用的机械性能指标, 都是在特定条件下用规定的测试方法得出, 因为与实用工作状况不尽相同, 所以选用数据时应考虑安全系数。

(一) 强度

材料承载后, 抵抗塑性变形和断裂的能力, 称为强度。根据载荷的性质不同, 有抗拉、抗压、弯曲、剪切、扭转等几种强度。最常用的是抗拉强度。按 GB 228—76 规定, 需进行拉伸试验测定。

拉伸试验是把专门制作的标准试样装在拉伸试验机上进行的。试样受静拉力后便发生变形。如果去除外力后, 试样能恢复原形状, 这种变形称为弹性变形; 如果去除外力后, 试样不能恢复原形状, 则称为塑性变形。退火低碳钢试样在拉伸试验中, 先发生弹性变形, 并且随着外力的增加变形量增加; 当外力增加到一定程度时, 出现了外力并未增加而变形仍能继续进行的现象, 称为屈服。屈服后的试样, 随外力增加塑性变形量也增加, 直至断裂。

根据试样所承受的外力(载荷 P) 与变形量(伸长量 ΔL) 的对应关系, 可绘出拉伸曲线 ($P-\Delta L$ 曲线), 见教材图 1-2。

1. 应力-应变曲线 试样受外力后, 其内部产生大小与外力相等的抗力(亦称内力)。单位横截面积上的内力, 称为应力(σ);

$$\sigma = \frac{P}{F_0}$$

式中 P ——载荷；

F_0 ——试样原横截面积。

应变是指试样受外力后，单位长度上的变形量(ϵ)；

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\%$$

式中 ΔL ——试样受外力后的总伸长量；

L_0 ——试样原始长度。

应力-应变曲线是描述应力与应变关系的曲线。材料的性能不同，其曲线的形状不同，常见的有四种类型，如图 1-1 所示，其中 a)、b)、c) 为塑性材料，d) 为脆性材料。

拉伸曲线和应力-应变曲线形状相似，但坐标不同。应力-应变曲线不受试样尺寸的影响，故可直接测出某些强度、塑性指标。

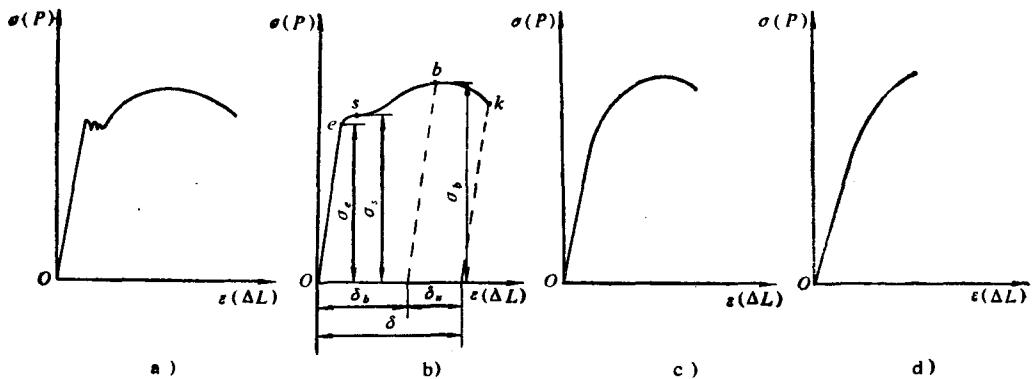


图1-1 四种不同类型的应力-应变曲线

a) 低碳钢 (退火) b) 低碳钢 (正火) c) 调质钢 d) 铸铁

2. 强度指标 所有强度指标都以应力表示，其物理意义是反映材料受外力后不同变形阶段的极限应力值。常规强度指标及其应用，见表 1-1。

在工程上，把 σ_s/σ_b 的值称为屈强比。其值越高，材料强度的有效利用率越高，但过高塑性储备小，可靠性差，一般以 0.75 左右为宜。

(二) 塑性

材料断裂前发生塑性变形的能力，称为塑性。塑性指标通常用延伸率 (δ) 和断面收缩率 (ψ) 表示，两者都是无量数。

δ 值受试样尺寸的影响较大，因为它是由与试样标距长度有关的均匀延伸率 (δ_0) 和与试样直径有关的缩颈部位的集中延伸率 (δ_s) 两部分组成的 (见图 1-1 b)，所以标距不同的延伸率不能相互比较。同一材料的延伸率一般 $\delta_5 > \delta_{10}$ 。

ψ 不受试样标距长度的影响，所以能更真实地反映材料的塑性。

材料的塑性好，在接受焊接及变形加工时容易保证质量，在服役中不会因超载而突然断裂，较为安全。但塑性过高，会限制材料强度水平的发挥，所以设计机械零件时应使强度和塑性适当匹配。

(三) 冲击韧性

材料承受冲击载荷的能力称为冲击韧性。由于冲击载荷的加载速度大，使材料的塑性下降，脆性增大，所以其破坏性比静载荷大。根据冲击载荷能量的不同，分为一次冲击韧性和小能量多次冲击抗力（简称多冲抗力）。

1. 一次冲击韧性 在工程上，常用一次冲击弯曲试验测定的冲击值 (a_k) 表示冲击韧性，见表 1-1。

2. 多冲抗力 多次冲击是在连续冲击试验机上进行的。为了反映缺口对多冲抗力的影响，通常将材料做成专门缺口试样，如图 1-2 所示。

试样受双点冲锤多次冲击，每冲一次试样转过一定角度，直至断裂。通常以一定冲击能量下试样由初始至断裂时的冲击次数，或以一定冲击次数的冲击能量，做为多冲抗力指标。

多冲抗力是体现材料强度与塑性的综合指标。当冲击能量高时，材料的多冲抗力主要取决于塑性；冲击能量低时，则其主要取决于强度。必须指出，一次冲击韧性值高的材料，多冲抗力不一定好。例如某厂生产的锻锤锤杆 (45 钢)，原采用调质 (HB 227~238)， a_k 值很高，但在使用中常常早期折断；后改为淬火加中温回火 (HRC40~45)，改善了多冲抗力，大大提高了寿命。这说明了机械零件的强度与塑性适当匹配的重要性。

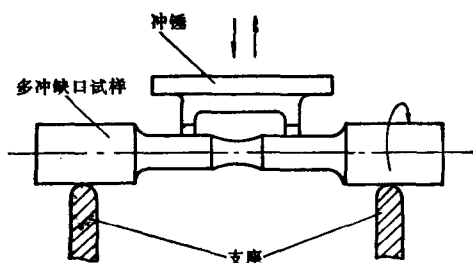


图1-2 多次冲击试验示意图

(四) 硬度

硬度是指材料软硬的程度。许多机械零件和工、模具，必需具有相当的硬度，才能保证它们的使用性能和寿命。编制切削和冷冲压工艺规程时，硬度是主要考虑因素之一。同时，因为硬度是机械性能的综合体现，所以有些机械零件只对材料的性能提出硬度要求。硬度试验无需专门试样，又不破坏工件，而且操作简单、迅速。所以，在生产中广泛应用硬度指标。

根据硬度试验的方法不同，可有多种硬度指标。它们各有不同的优缺点和使用范围。工业上常用的是压入法测定的硬度指标，有以下几种：

1. 布氏硬度 (HB) 布氏硬度是在规定载荷下，采用压入钢球法测定的。其主要优点是能准确地反映材料的硬度值。但由于压头为淬火钢球，为了防止钢球变形影响精度，故不能测 HB>450 的材料。另外，由于压痕较大，也不适于测成品件及过薄的零件。

布氏硬度试验规范是根据材料种类和试样厚度尺寸选择的，参见教材中表 1-2。

2. 洛氏硬度 (HR) 根据载荷与压头种类的配合不同，可测出各种洛氏硬度值，常用的有三种，即 HRC、HRB、HRA，见教材表 1-3。

与布氏硬度法比较，洛氏硬度试验操作简单、迅速，可直接读出硬度值，不会损坏零件表面，故可测量成品或半成品零件的硬度；但由于压痕很小，当金属材料的组织不均匀时会影响测量精确度，故常测 3~5 点后取其平均值。

3. 维氏硬度 (HV) 维氏硬度试验与前两种硬度比较，有许多优点 它既不象布氏硬

度试验时受载荷与压头直径比例关系的约束,也不存在压头变形问题。由于压痕清晰,采用对角线平均长度计量,精确可靠,硬度值误差小,同时,它能测量从极软材料(HV10)到极硬材料(HV1000),而不需要更换标尺,还特别适于测量极薄件和渗碳层、氮化层、电镀层等。其不足之处是试验速度不如洛氏硬度试验高,故不宜用于大批量生产的常规试验。

利用压入法测定硬度时,可以把金属材料的硬度定义为抵抗更硬物体压入其表面的能力。其实质是金属材料在局部小体积范围内抵抗塑性变形及断裂的能力。所以,硬度与强度指标有一定关系,但二者之间没有严格的计算公式,下列经验公式可供参考:

低碳钢	$\sigma_s \approx 0.36HB$
高碳钢	$\sigma_s \approx 0.34HB$
调质合金钢	$\sigma_s \approx 0.325HB$
灰口铸铁	$\sigma_s \approx 0.1HB$
高强度材料	$\sigma_s \approx \frac{HV}{3}$
普通材料	$\sigma_s \approx \frac{HV}{3} (0.1)^n$

式中 n 为材料的加工硬化系数。

(五) 疲劳强度和断裂韧性

1. 疲劳强度 机械零件在远较材料的屈服强度低的交变循环应力作用下,长时间工作而无明显塑性变形就突然断裂的现象,称为疲劳。由于疲劳破坏无明显的塑性变形征兆,而且断裂是瞬时发生的,所以危险性很大。零件在低于屈服极限应力下工作为什么还会发生断裂呢?这是因为每一个受力的零件都有薄弱部位(称为危险断面),该部位断面应力相对较大,而且还会不可避免地存在着损伤或应力集中(例如由于结构上的因素或者由于腐蚀、刻划、内部组织不均匀、存在缺陷等),在长时间工作中,使损伤积累扩展,造成局部应力超过允许值,产生微裂纹。这就是疲劳裂纹的疲劳源,以后逐步扩展,使有效受力面积减少,以至瞬时断裂。

疲劳强度是零件寿命设计的主要依据。在一部机器中,对于关键零件都要分析出危险断面,使其许用应力一般不超过材料的疲劳强度,以保证安全运行。当然,对于一般零件,可采用有限疲劳寿命设计。

2. 断裂韧性 工程上使用的各种金属材料,普遍存在缺陷(微裂纹)。有裂纹的零件受力后应力不再均匀分布,而产生应力集中,在裂纹前沿形成应力场,其情况用应力强度因子(K)来描述。 K 是与应力(σ)的性质和方向、材料的性质、裂纹几何参数有关的函数。当应力(σ)与裂纹平面垂直时(张开型裂纹),应力强度因子用 K_I 表示。 K_I 与裂纹存在下述关系:

$$K_I = \eta \sigma a^{\frac{1}{2}}$$

式中 η 是和裂纹形状、外加应力方式、试样类型有关的系数; a 是裂纹的半长。

由上式可知,在裂纹一定时, K_I 随着 σ 的增加而增大。当 σ 增加到使裂纹开始扩张时,导致材料断裂, K_I 达到临界值 K_{Ic} ,称为临界应力强度因子,这时的 σ 即为材料的实际强度。

表1-1 机械性能总结表

性能名称	符号意义	单位	获得方法或含义	应用
弹性模量	正弹性模量 E	Pa (MPa)	在应力与应变的关系符合虎克定律时, 应力与应变的比值: $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ $G = \frac{\tau}{\gamma}$	用于刚度计算
	切弹性模量 G			
刚度	EF (拉压) EJ (弯曲) GJ (扭转)		材料抵抗弹性变形的能力。在比例极限以内计量	工程技术上, 根据情况常以挠度(f)或扭转角(θ)来核算刚度, 以免因零件过量弹性变形而失去精度或效用
强度	弹性极限 σ_e	Pa (MPa)	试样能保持纯弹性变形的最大应力	弹性零件要求材料有高的弹性极限, 一般零件不要求
	屈服极限 $\sigma_s(\sigma_{0.2})$		试样出现应力不再增加而变形仍在进行的现象时的应力, $\sigma_s = \frac{P_s}{F_0}$, 使试样产生塑性变形为0.2%时的应力为条件屈服极限 $\sigma_{0.2} = \frac{P_{0.2}}{F_0}$	工、模具和机械零件所受应力均应小于屈服极限, 否则将因塑性变形而失效, 所以是强度计算的重要依据
	抗拉强度极限 σ_b		能使试样保持最大均匀变形的极限应力 $\sigma_b = \frac{P_b}{F_0}$	是强度计算的重要依据。零件所受应力超过 σ_b , 将产生断裂
	疲劳强度 σ_{-1} (弯曲) τ_{-1} (剪切)	Pa (MPa)	试样在交变应力作用下, 经无限次循环而不断裂的最大应力	从理论上讲, 零件所受应力低于疲劳强度时, 其疲劳寿命是无限的; 反之, 则是有限的。在工程上, 规定钢铁材料经 10^7 、有色金属经 10^8 次以上, 即可视为无限次循环
塑性	延伸率 δ	%	试样被拉断后全标距长的伸长量与原标距长比值的百分率	δ 与 ψ 的数值越大, 材料的塑性就越好 一般零件, 均需具有一定的塑性储备, 以提高安全性; 对于冲压件等, 则要求有较高的塑性
	断面收缩率 ψ		试样被拉断后, 缩颈处横截面积的收缩量与原横截面积比值的百分率 $\psi = \frac{\Delta F}{F_0} \times 100\%$	
韧性	一次冲击韧性 a_k	J/cm ²	冲断试样后, 单位横截面积上所消耗的冲击功: $a_k = \frac{AK}{F}$	a_k 值越大, 冲击韧性越好。用 a_k 值测量材料的冷脆性转化温度 (T_K)。 a_k 不做为设计计算数据
	多冲抗力	以抗冲次数或抗冲能量表示	试样由原始至断裂全过程所消耗的冲击功	反映材料抵抗小能量多次冲击的能力。耐冲次数越多, 韧性越好
	断裂韧性 K_{Ic} (张开型裂纹)	MN·m ^{$\frac{3}{2}$}	使裂纹开始扩张时的应力强度因子	一定程度上反映了材料抗脆性断裂的能力。主要用于高强度大断面零件

(续)

性能名称	符号意义		单位	获得方法或含义	应用
硬度	布氏硬度 HB		kgf/mm ² (不用标出)	在一定压力下将直径为 D 的钢球压入被测金属表面, 测出压坑直径后, 查表得硬度值	测量硬度为 HB3~450 范围的钢铁、有色金属及其合金材料
	洛氏硬度	HRC	无	在 1500N 压力下, 将 120° 金刚石锥体压入被测金属表面, 去除主加载荷后, 直接读出硬度值	测 HRC20~67 的淬火钢件及某些表面硬化件等
		HRA	无	只是载荷为 600N, 其他同 HRC	测 HRA70 以上的薄层表面硬化件及薄件、硬质合金等
		HRB	无	载荷 1000N 压头为 $\phi 1.588$ 钢球, 其过程同 HRC 的测定	测 HRB25~100 的铜、铝合金及软钢等
	维氏硬度 HV		不 注 单 位	在规定压力下, 将 136° 的金刚石正四棱锥压入被测金属表面, 测出压痕对角线平均长度后, 查表得硬度值	主要用于测极薄件及薄层表面硬化件等

因为 K_{Ic} 表明了材料抵抗裂纹扩张的能力, 在一定程度上反映了材料抵抗脆性断裂的能力, 故称 K_{Ic} 为材料的断裂韧性。对用高强度材料制造的大断面零件, 提出断裂韧性要求具有重要意义; 对用普通材料制造的零件, 因为其破坏形式主要是韧性断裂, 所以不必提出断裂韧性要求。

五、思考题和习题提示

1. 略。

2. 在测定强度上 σ_s 和 $\sigma_{0.2}$ 有什么不同?

提示: σ_s 是使试样产生屈服现象时的应力值, 用于测定有明显屈服点材料的屈服强度。 $\sigma_{0.2}$ 是使试样产生塑性变形 0.2% 时应力, 用于测定无明显屈服点材料的条件屈服强度。

3. 在设计机械时多用哪两种强度指标? 为什么?

提示: (1) 屈服强度。因为大多数机械零件产生塑性变形时即告失效。(2) 抗拉强度。因为其数据易准确测定, 也容易在手册中查到, 用于一般对产生塑性变形要求不严格的零件。

4. 设计刚度好的零件, 应根据何种指标选择材料? 采用何种材料为宜? 材料的 E 越大, 其塑性越差, 这种说法是否正确? 为什么?

提示: 应根据弹性模量选择材料。要求刚度好的零件, 应选用弹性模量大的材料, 选用 E 值较大的钢铁材料为宜。

材料的弹性模量 (E) 的大小, 主要决定于原子间结合力 (键力) 的强弱, 与其内部组织关系不大; 而材料的塑性是其承受永久变形而不被破坏的能力, 与其内部组织有密切关系。二者无直接联系, 所以 E 越大, 塑性越差的说法不正确。

5. 略。

6. 标距不同的延伸率能否进行比较? 为什么?

提示: 不能比较。原因略, 见本章 (二) 的内容。

7. 常用的硬度方法有几种? 其应用范围如何? 这些方法测出的硬度值能否进行比较?

提示：工业上常用的有布氏硬度法、洛氏硬度法和维氏硬度法三种。应用范围见本章总结表。这些方法测出的硬度值不能直接比较，但可以通过查表或试验，换算成同一种硬度后再进行比较。

8. 略。

9. 反映材料受冲击载荷的性能指标是什么？不同条件下测定的这种指标能否比较？怎样应用这种性能指标？ T_K 的意义是什么？

提示：冲击韧性值 (a_k)。不同条件下测定的 a_k 不能进行比较，这是因为冲击韧性值受试验条件、试样的形状、尺寸及其组织缺陷等影响很大。

冲击韧性的应用：

(1) a_k 值越高，材料的塑性、韧性越好，其受冲击载荷时，不会突然断裂，较为安全，普通件一般要求 $a_k < 29 \sim 49 \text{ J/cm}^2$ 。

(2) 利用测定 a_k ，鉴定材料的冶金质量及热加工质量。

(3) 以测定不同温度下的 a_k 值来判定材料的冷脆性转化温度 (T_K)。

T_K 是材料从塑性状态转化为脆性状态时的温度。零件在 T_K 温度以上工作，材料呈塑性状态，韧性较高；在 T_K 温度以下使用，则呈脆性状态，韧性很低。

10. 疲劳破坏是怎样形成的？提高零件疲劳寿命的方法有哪些？为什么表面粗糙和零件尺寸增大能使材料的疲劳强度值减小？

提示：疲劳破坏是首先形成一个疲劳源（微裂纹），在其附近形成较大的应力场促使疲劳裂纹逐渐扩展，以至最后突然断裂。

提高疲劳寿命的方法，就是消除或减少疲劳源并延缓疲劳裂纹的发展。一般要在结构上避免应力集中；制定合理的工艺，使材料得到韧性组织，减少内部冶金缺陷；降低表面粗糙度，避免表面划伤、腐蚀；强化表面，在表面造成压应力等。

表面粗糙易形成疲劳源。零件尺寸增大，其内部组织不易均匀，也易存在夹杂物等各种缺陷，这些均易形成疲劳源，并加快疲劳裂纹的扩展。

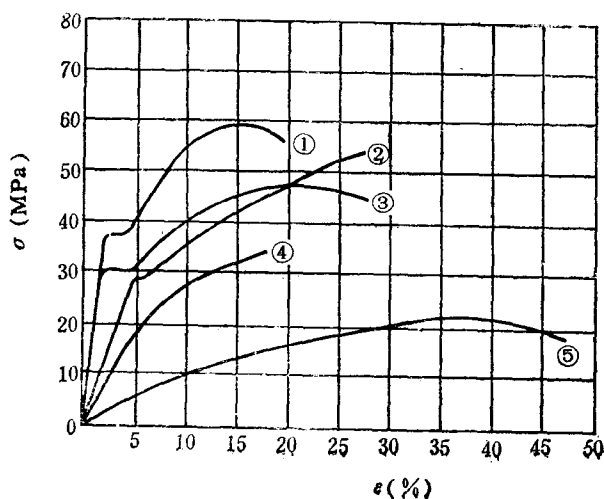
11. 断裂韧性是表明材料的何种性能指标？为什么要求在零件设计时考虑这种指标？

提示：断裂韧性是衡量材料抵抗裂纹扩张的抗力，在一定程度上反映了材料抵抗脆性断裂的能力，表明材料韧性大小的性能指标。在零件设计时考虑断裂韧性可避免盲目使用过载安全系数而采用高强度的材料。

六、补充题

1. 如图所示，为五种材料的应力-应变曲线：①45钢，②铝青铜，③35钢，④硬铝，⑤为纯铜，试问：

(1) 当外加应力为 30 MPa 时，各材料处于什么状态？



(2) 有一用 35 钢制做的轴, 使用中发现弹性弯曲较大, 如改用 45 钢制作该轴, 能否减少弹性变形? 如已出现塑性变形呢?

提示: (1) ①处于弹性变形状态, ②、③、④处于塑性变形状态, ⑤已断裂。

(2) 不能减少弹性变形。如已出现塑性变形, 改用 45 钢时可使塑性变形减小, 或不出现塑性变形。

2. 下列说法是否正确, 如不正确请更正:

(1) 机械在运行中各零件都承受外加载荷, 材料强度高不会变形, 材料强度低的一定会变形。

(2) 材料的强度高, 其硬度就高, 所以刚度大。

(3) 强度高的材料, 塑性都低。

(4) 弹性极限高的材料, 所产生的弹性变形就大。

提示: (1) 不正确。只要零件承受外加载荷不论其材料强度高低, 都会产生变形。

(2) 不正确。材料的强度高, 其硬度不一定高, 刚度更不一定大。

(3) 不正确。强度高的材料, 塑性不一定低。

(4) 不正确。材料的弹性极限高, 所产生的弹性变形不一定大。

第二章 金属的结构和结晶

一、学习目的和要求

本章是属金属学的基础部分。学习目的在于掌握有关结晶及晶体结构的基本概念，为学习本课程的后续部分及其它有关课程打好基础。

学完本章后，要求熟悉常用的金属晶体结构、晶体中的缺陷及其对材料性能的影响，对结晶过程建立初步概念；并了解铸锭的组织及其基本性能。

二、重点和难点

重点：（1）三种常见的金属晶体结构及其基本性能；（2）实际金属晶体缺陷及其对性能的影响；（3）结晶条件、结晶过程及细化晶粒的基本方法。

难点是结晶机理，但对机制专业及近机类专业的学生只要求一般了解。另外，就是确定晶面指数和晶向指数。

三、学习方法

本章虽然名词概念多、机理深，但只要结合实践学习，前后呼应，加强联系，就可以掌握。例如，学习晶格要能举出实例；学习晶体缺陷要联系对材料性能的影响；学习结晶及细化晶粒的方法，就要了解晶界的作用。这样不仅可以加深对概念的理解，而且把性能、组织结构、工艺、成分和应用联系起来，按照本专业的需要学习。这也是本课程的基本学习规律。

四、内容提要 and 解释

（一）金属和金属键

通过日常工作和生活实践，人们都知道金属具有光泽而不透明，有良好的导电及导热性，有较好的塑性等。金属的这些特性与其原子的结合方式——金属键有关，而金属键又和金属的原子结构有关。

金属原子结构的特点是最外层电子数较少（一般是1~2个），与原子核的结合力较弱，容易脱离原子核的束缚而成为公有化的自由电子。失去电子的原子便成为正离子。呈一定规律排列的正离子与公有化的自由电子靠库伦引力结合起来，这种结合力称为金属键。当金属的原子层间发生相对位移时，呈正离子状态的原子和自由电子仍保持结合，而未分离，所以金属具有较好的塑性。金属的自由电子可吸收可见光的能量而激发到较高能态，故金属不透明。当高能态的自由电子返回到原低能态时，会发生辐射，从而使金属具有不同颜色的光泽。金属其他的某些特性也可以用金属键来解释，望同学们自己思考。

（二）金属的晶体结构

1. 晶体和晶格 晶体和晶格是两个不同的概念。

（1）晶体 原子在空间呈规则排列的固体物质称为晶体。固态金属一般都是晶体。金属晶体内的原子是靠金属键结合的。金属键的特点是没有饱和性，也没有方向性。故可以把金属晶体内的原子假设为刚性球，这样，晶体就可由刚性球堆砌的模型来代表，从而把金属晶体的形象具体化了，为研究晶体的结构提供了方便。至于所以要研究晶体，是因为金属的性

能不仅决定于原子间的键合方式,而且和原子在空间的排列情况密切相关。例如,同为金属晶体,由于原子在空间的排列方式不同,其强度、塑性等性能差异很大。即使是同一金属材料,在原子的排列发生改变时(固态相变),性能也会发生变化。另外,原子排列方式(晶格类型)不变时,结构上的某些变化(晶体缺陷),对性能也有很大影响,如出现加工硬化时就属于这种情况。

(2) 晶格 由于金属晶体的原子结合得非常紧凑密集,密密麻麻地堆积在一起,很难看清其内部原子的排列规律和特点。为了便于分析和描述晶体内原子的分布情况,人们又进一步把每个原子假设为一个几何点,忽略其尺寸和重量,再用假想线把这些点连接起来,得到一个表示金属内部原子排列规律的抽象的空间格子,称为晶格。金属中常见的晶格类型,有体心立方、面心立方和密排六方三种,见教材图 2-4 ~ 6。能够代表晶格结构的最小单元,称为晶胞。晶胞的大小和形状用晶格常数和棱边夹角表示,见教材图 2-3 b、c。

2. 单晶体和多晶体

(1) 单晶体 结晶位向完全一致的晶体,称为单晶体。在单晶体中,不同方向的原子层(晶面)或原子列(晶向)上,原子分布的疏密情况不同,原子结合力也不同,使其性能各异,称为各向异性。例如,原子排列密度大的晶面或晶向上强度较高。为了分析不同晶面或晶向上原子的分布情况,我们把不同晶面(或晶向)用数字符号来表示,以示区分,称为晶面指数(或晶向指数)。在常见的三种金属晶格中,特殊晶面及晶向对金属的塑性变形具有重要意义,所以应会确定晶面及晶向指数。密氏晶面指数和晶向指数的确定方法见教材第二章习题 5。

(2) 多晶体 它是许多结晶位向不同的单晶体的聚合体。其中每个小单晶体都是由一个晶核长成的无规则外形的多面体(截面呈多边形),称为晶粒。晶粒间的交界面,称为晶界。在多晶体中,由于各个晶粒的位向是不相同的,而各个方向上原子分布的密度大致平均,所以多晶体不显示各个晶粒的各向异性,即在各个方向性能基本相同,称为伪各向同性或伪等向性。

3. 实际金属晶体的结构 原子呈完全规则排列的晶体,称为理想晶体。实际上,金属晶体中的某些区域常由于结晶条件或加工等方面的影响,使原子的排列规则受到破坏,因而内部存在着大量的缺陷。根据这些缺陷的几何特点,可把它们分为三大类:

(1) 点缺陷 是指长、宽、高三个方向上尺寸都很小的缺陷。如置换原子、空位、空隙原子及其并存的复合点缺陷等。

(2) 线缺陷 它是在一个方向上尺寸较大,而在另外两个方向上尺寸很小的缺陷,如位错。所谓位错,就是晶体中某处有一列或若干列原子,发生了有规律的错排。由于错排的形式不同,又可分为刃型位错、螺型位错、混合型位错等各种位错。

(3) 面缺陷 它是在两个方向上尺寸较大,而在另一个方向尺寸很小的缺陷,如晶体表面、晶界、亚晶界等。

晶体中的缺陷,对材料的强化有重要作用。凡是有晶体缺陷及其附近区域,原子的规则排列都受到干扰或破坏,存在着畸变能,阻碍原子向某一方向运动。所以,它会使金属的强度特别是屈服强度提高,而使塑性降低。此外,各种缺陷还有自己的特殊贡献,如空位与间隙原子的运动,是金属扩散的重要方式。对于晶界,由于其结构的特点,表现更为复杂。例如,晶界易被腐蚀,在晶界上原子扩散较快,由于晶界易聚集杂质,相变时晶界处优先形核(所

以细晶粒较粗晶粒相变温度稍低)。此外,晶界的熔点低于晶内,高温时晶界易发生粘滞性滑动,所以耐热钢不要求晶粒过细。但在常温下,晶界阻碍滑移。晶粒越细,晶界越多,滑移的阻力就越大,强度就越高,同时还能把变形量分散到更多的晶粒中,使承受变形的能力增加,塑性增大。所以对于一般金属材料都要细化晶粒。

(三) 纯金属的结晶

结晶就是原子从任意一种聚集态转变成另一种规则排列状态的过程。这个过程可以是液态金属的结晶,也可以是固态金属的相变过程。学习金属的结晶需要明确两点:(1)金属结晶一定要有过冷度才能进行;(2)结晶过程是由形成晶核及其长大两阶段组成。

1. 过冷度 教材中图 2-18 为纯金属的冷却曲线。图中 T_0 为金属的晶体与液体平衡共存的温度,称为理论结晶温度。显然,在这一温度时,金属的结晶速度与熔化速度相等,所以只有进一步冷却,使金属的实际结晶温度 (T_n) 低于 T_0 时,结晶才能进行。结晶时 T_n 低于 T_0 的现象称为过冷。其相差的度数 ΔT , 称为过冷度 ($\Delta T = T_0 - T_n$)。纯金属的冷却曲线出现一个水平线段,说明其结晶过程是一个恒温过程。这是由于放出的结晶潜热与散热损失相抵消的缘故。直到结晶完了温度才继续下降。

2. 结晶过程 教材中图 2-20~22 表示了结晶的过程,首先形成晶核并不断长大,同时又有新晶核不断的形成、长大,直至全部液体金属结晶完为止。根据结晶条件不同,形核有自发形核和非自发形核两种。后者是依附于金属液中未溶固体微粒形成的,所以较自发形核容易。实际铸造生产中的结晶,非自发形核占大多数。

金属结晶的速度,决定于形成晶核的速度、数量(形核率 N)及晶核的长大速度(V)。形核率越高,获得的晶粒越细,材料的强度、硬度越高,其塑性、韧性也好。铸造生产中常用以下方法细化晶粒:

(1) 增大过冷度 金属结晶时过冷度增大, N/V 比值增大,晶粒细化。因此可用低温浇注及增大冷却速度的方法使晶粒细化。但对大型铸件不容易获得较大的过冷度,另外,对精密复杂件过冷度大时会产生较大应力而造成缺陷或开裂,所以在实际生产中常用变质处理来细化晶粒。

(2) 变质处理 浇注时,向金属液中加入一定量的变质剂,可以在整个体积内同时得到大量的非自发晶核,从而使整个铸件获得均匀细小的晶粒。

对于固态金属可以用热处理或压力加工的方法使晶粒细化。

(四) 金属铸锭的组织

铸锭的结晶属于大体积结晶。其特点是过冷度小,整个截面存在着明显的温度梯度,结晶是从表面至中心逐步进行的,不是整个截面均匀结晶,所以结晶后的组织粗细不均,形状也不同。将铸锭剖开可以看到三个不同的晶区:表层为细等轴晶粒,中间层为柱状晶粒,中心为粗等轴晶粒。

等轴晶粒是在散热没有明显的方向性、近于同时结晶形成的,过冷度大晶粒则细;反之则粗。等轴晶粒的优点是性能比较均匀一致,无脆弱晶界面,其不足是易形成分散性缩孔(疏松)。

柱状晶粒是在散热具有明显方向性(垂直于模壁),由外向里顺序结晶(晶粒沿温度梯度长大)形成的。其特点是性能具有方向性。由于柱状晶粒的交界面上易存杂质,所以性能较低;但柱状晶晶质致密,所以沿柱状晶的轴向强度高,韧性也较好,适用于那些只要求单