

职工高等工业专科学校试用教材

# 金属材料及热处理

赵 忠 主编

机械工业出版社

职工高等工业专科学校试用教材

# 金属材料及热处理

赵忠 主编



机械工业出版社

本书是为职工高等工业专科学校机械制造工艺与设备专业及相近专业编写的试用教材。

本书从职工高等工业专科学校的实际需要出发,扼要讲授金属学、金属材料及热处理方面的基本内容。共包括金属的机械性能、金属的结构和结晶、金属的塑性变形与再结晶、铁碳、有色金属、机械零件选材及热处理工艺的应用、金属的分析与检验方法等十一章。为了加深理解和学用结合,每章还列出思考题及习题,并附有实验指导书。此外,书后还附有国外钢种编号及对照表和硬度换算表。

本书在选材方面,注意了确保基础、加强理论联系实际及近代科学成果。

本书亦适于机械设计和生产部门的技术人员阅读参考。

## 金属材料及热处理

赵忠 主编

责任编辑 董连仁

\*

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 787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张 15<sup>1</sup>/<sub>2</sub>·字数 378千字

1986年11月北京第一版·1986年11月北京第一次印刷

印数 00,001—19,700·定价 2.65元

\*

统一书号: 15033·6457

## 前 言

本书是根据教育部 1983 年 11 月在无锡召开的全国职工高等工业专科学校基础课、技术基础课教学大纲审定会审定的机械制造工艺与设备专业《金属材料及热处理》教学大纲编写的。目前职工大学大多采用的普通高等学校教材，不完全适合职工大学，而本教材是为满足职工大学特点而编写的。

本书主要目标是，为培养机制专业学生能正确认识及合理使用金属材料，了解热处理的基本原理和合理选定热处理工艺方法，妥善安排零件加工工艺路线等方面的初步能力。

本书扼要讲授以下内容：金属材料的性能与成分、组织、结构以及加工工艺之间的关系；钢铁材料和有色金属及其合金的热处理基本原理和工艺，热处理在机械零件加工过程中的地位和作用；介绍各常用金属材料如碳钢、合金钢、铸铁、有色金属及其合金的分类、编号、成分、组织结构、性能和用途；选用金属材料的原则；热处理技术条件标注。最后，简单介绍金属的分析与检验方法。

为了便于学生学习，每章之末还列出思考题及习题，书后并附录实验指导书等。标有※号的内容是按教学大纲加入的，供选修和自学之用。由于职工大学所在单位生产任务不同，对材料的要求不一样，因此关于金属材料这部分的内容，可根据具体情况有所选择和侧重地讲授。

本书计量单位统一采用我国法定单位制，并以国际代号表示，如强度( $\sigma_b$ ,  $\sigma_s$  等)指标的单位一律用 Pa( $N/m^2$ )。

本书由松陵机械公司工学院赵忠同志主编；中央电大主讲教师梁光启同志主审。书中第一和第二章为广州业余大学黄福炽同志编写。南京汽车制造厂蔡崇德同志、苏州机械局职工大学叶勉琛同志、沙市市职工大学李继忠同志、天津市工人业余技术大学崔志信同志、辽阳化纤工学院高祯荣同志、第一汽车制造厂职工大学张温林同志、北京二七机车工厂职工大学李俊才同志、上海机电工业局职工大学吴淑琴同志、唐山机车车辆厂职工大学李子达同志审阅了本书初稿，提出很多宝贵意见；在编写过程中曾得到华南工学院、广州业余大学及松陵机械公司工学院教职员工的的热情支持和帮助，使本书能顺利出版。在此一并表示衷心的感谢。

由于编审水平有限，加之时间仓促，书中缺点和错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

## 本书常用符号

$\sigma_e$	弹性极限	$A$ 或 $\gamma$	奥氏体
$\sigma_s$	屈服强度 (屈服极限)	$Cm$	渗碳体
$\sigma_{0.2}$	条件屈服强度	$P$	珠光体
$\sigma_b$	抗拉强度 (强度极限)	$L_d$	高温莱氏体
$E$	弹性模数	$L'_d$	低温莱氏体
$G$	切变弹性模数	$S$	索氏体
$\sigma_{-1}$	弯曲循环载荷下测定的疲劳强度	$T$	屈氏体
$\tau_{-1}$	剪切循环载荷下测定的疲劳强度	$B$	贝氏体
$\delta$	延伸率	$M$	马氏体
$\psi$	断面收缩率	$V_x$	临界冷却速度
$a_k$	冲击韧性	$A_1$	—— 共析转变平衡临界点
$K_{Ic}$	断裂韧性	$A_s$	—— $\gamma \rightleftharpoons \alpha$ 转变平衡临界点
HB	布氏硬度	$A_{cm}$	—— 奥氏体析出或溶入渗碳体的平衡临界点
HR	洛氏硬度	$Ac_1, Ac_2, Ac_{cm}$	加热时的临界点
HV	维氏硬度	$Ar_1, Ar_2, Ar_{cm}$	冷却时的临界点
$\perp$	刃型位错	$D_0$	临界淬透直径
$T$ 或 $t$	温度	$J$	末端淬透性
$F$	自由能	$G'$	石墨
$N$	结晶过程中的形核率	$C_{s,q}$	碳当量
$V$	结晶过程中的线长大速度	$G \cdot P \cdot 区$	富铜原子区
$\delta$	高温铁素体		
$F$ 或 $\alpha$	铁素体		

# 目 录

绪论 .....	1	思考题和习题 .....	27
<b>第一章 金属的机械性能</b> .....	<b>3</b>	<b>第三章 金属的塑性变形与再结晶</b> .....	<b>29</b>
一、强度指标 .....	3	一、金属的塑性变形 .....	29
1. 弹性极限 .....	3	1. 金属的变形与断裂 .....	29
2. 屈服强度 .....	4	2. 单晶体的塑性变形 .....	30
3. 抗拉强度 .....	4	3. 多晶体的塑性变形 .....	32
4. 弹性模量 .....	4	二、塑性变形对金属组织和性能的影响 .....	34
5. 疲劳强度 .....	5	1. 晶粒沿变形方向拉长,性能趋于各向异性 .....	34
二、塑性指标 .....	6	2. 位错密度的增加、亚结构的形成和加工硬化 .....	34
1. 延伸率 .....	7	3. 形变织构的产生 .....	35
2. 断面收缩率 .....	7	4. 内应力的产生 .....	35
三、韧性指标 .....	7	三、回复与再结晶 .....	36
1. 冲击韧性 .....	7	1. 变形金属在加热时组织和性能的变化 .....	36
*2. 断裂韧性 .....	8	2. 再结晶温度和影响再结晶晶粒大小的因素 .....	38
四、硬度指标 .....	11	四、金属的热加工 .....	40
1. 布氏硬度 .....	11	1. 冷加工与热加工的区别 .....	40
2. 洛氏硬度 .....	12	2. 热加工对材料组织和性能的影响 .....	40
3. 维氏硬度 .....	13	思考题和习题 .....	42
思考题和习题 .....	14	<b>第四章 合金的结构和结晶</b> .....	<b>43</b>
<b>第二章 金属的结构和结晶</b> .....	<b>15</b>	一、合金中的相结构 .....	43
一、金属的晶体结构 .....	15	1. 合金和相的概念 .....	43
1. 金属键 .....	15	2. 合金中的相结构类型 .....	44
2. 金属晶体结构的基本概念 .....	16	3. 合金的组织 .....	47
3. 常见金属的晶格类型 .....	16	二、二元合金相图 .....	47
4. 配位数和致密度 .....	18	1. 二元相图的建立 .....	47
5. 晶面指数和晶向指数 .....	18	2. 基本相图 .....	48
二、实际金属的结构 .....	19	三、相图与合金性能的关系 .....	55
三、纯金属的结晶过程 .....	22	1. 机械性能与相图的关系 .....	55
1. 金属结晶的基本规律 .....	22	2. 合金铸造性能与相图的关系 .....	56
2. 晶核的形成与长大 .....	24	思考题和习题 .....	57
3. 影响生核和长大的因素及控制晶粒尺寸的方法 .....	24	<b>第五章 铁碳相图和碳钢</b> .....	<b>59</b>
四、金属铸锭和焊缝的组织 .....	25	一、纯铁、铁碳合金的相结构及其性能 .....	59
1. 铸锭的组织 .....	25		
2. 焊缝的组织 .....	26		
3. 铸造对金属材料性能的影响 .....	26		
*4. 定向结晶和单晶 .....	27		

1. 纯铁的同素异构转变 .....	59	4. 弹簧钢 .....	122
2. 铁碳合金中的相结构及其性能 .....	59	5. 滚动轴承钢 .....	125
二、Fe-Fe <sub>3</sub> C相图分析 .....	60	*6. 易切削钢 .....	126
1. Fe-Fe <sub>3</sub> C相图上点与线的分析 .....	60	*7. 超高强度钢 .....	128
2. 碳钢的组织转变过程 .....	62	四、工具钢 .....	130
3. 白口铸铁的结晶过程 .....	64	1. 工具钢的分类及编号 .....	130
4. Fe-Fe <sub>3</sub> C相图的应用 .....	65	2. 刃具钢 .....	130
三、碳钢 .....	66	3. 模具钢 .....	138
1. 含碳量对钢组织和机械性能的影响 .....	66	4. 量具钢 .....	141
2. 钢中常存杂质的影响 .....	67	五、具有特殊性能的合金钢 .....	142
3. 碳钢的分类 .....	67	1. 不锈钢 .....	142
4. 碳钢的编号与用途 .....	68	2. 耐热钢与高温合金 .....	150
思考题和习题 .....	70	3. 耐磨钢 .....	158
第六章 钢的热处理 .....	72	思考题和习题 .....	160
一、概述 .....	72	第八章 铸铁 .....	162
二、钢的热处理原理 .....	72	一、概述 .....	162
1. 钢在加热时的组织转变 .....	72	二、铸铁的石墨化 .....	162
2. 钢在冷却时的组织转变 .....	75	三、铸铁的分类 .....	163
三、钢的热处理工艺 .....	82	四、灰口铸铁 .....	164
1. 钢的退火 .....	82	1. 灰口铸铁的化学成分、组织、性能和用途 .....	164
2. 钢的正火 .....	84	2. 灰口铸铁的孕育处理及孕育铸铁 .....	165
3. 钢的淬火 .....	85	3. 灰口铸铁的热处理 .....	166
4. 钢的回火 .....	91	五、球墨铸铁 .....	167
5. 表面热处理 .....	94	1. 球墨铸铁的化学成分、组织和性能 .....	167
*6. 热处理新工艺简介 .....	102	2. 球墨铸铁的牌号和用途 .....	168
四、热处理的主要缺陷及其防止办法 .....	105	3. 球墨铸铁的热处理 .....	168
1. 过烧和过热 .....	105	*六、可锻铸铁 .....	170
2. 氧化和脱碳 .....	105	1. 可锻铸铁的化学成分和组织 .....	170
3. 变形与开裂 .....	105	2. 可锻铸铁的石墨化退火 .....	171
思考题和习题 .....	106	3. 可锻铸铁的牌号、性能及应用 .....	171
第七章 合金钢 .....	109	*七、特殊性能铸铁简介 .....	172
一、概述 .....	109	1. 耐热铸铁 .....	172
二、钢的合金化 .....	110	2. 耐磨铸铁 .....	172
1. 合金元素对钢中基本相的影响 .....	110	3. 耐蚀铸铁 .....	173
2. 合金元素对Fe-Fe <sub>3</sub> C相图的影响 .....	110	思考题和习题 .....	174
3. 合金元素对钢热处理的影响 .....	111	第九章 有色金属 .....	175
三、合金结构钢 .....	114	一、概述 .....	175
1. 普通低合金结构钢 .....	114	二、铝及铝合金 .....	175
2. 渗碳钢 .....	116	1. 工业纯铝 .....	175
3. 调质钢 .....	117	2. 铝合金的分类及热处理 .....	175

3. 变形铝合金.....	178	1. 退火和正火.....	211
4. 铸造铝合金.....	180	2. 调质处理.....	211
三、铜合金及滑动轴承合金 .....	184	3. 淬火、回火.....	211
1. 铜合金.....	184	六、典型零件选材与工艺分析 .....	212
2. 滑动轴承合金.....	188	1. 汽车、拖拉机齿轮.....	212
四、钛及钛合金 .....	191	2. 机床主轴.....	212
1. 纯钛.....	191	思考题和习题 .....	213
2. 钛合金的类型及热处理.....	192	第十一章 金属的分析与检验方法 .....	215
3. 常用钛合金.....	194	一、成分分析 .....	215
思考题和习题 .....	195	1. 化学分析.....	215
第十章 机械零件选材及热处理工艺的		2. 火花鉴别.....	215
应用 .....	196	3. 光谱分析.....	216
一、机械零件的失效形式 .....	196	4. 电子探针.....	217
1. 过量变形.....	196	二、组织分析 .....	218
2. 断裂.....	197	1. 低倍分析.....	218
3. 表面损伤.....	197	2. 显微分析.....	218
二、选材的基本原则 .....	198	三、无损探伤 .....	220
1. 材料的最终性能应满足零件的技术		1. 超声波探伤.....	220
要求.....	198	2. 磁力探伤.....	221
2. 材料的工艺性能良好.....	199	3. 荧光检验.....	221
3. 充分考虑经济性.....	206	4. X射线探伤.....	222
三、热处理工艺性能与零件设计的		5. $\gamma$ 射线探伤.....	222
关系 .....	207	思考题和习题 .....	223
1. 零件结构和夹具的设计.....	207	附录 .....	224
2. 预防淬火缺陷的其它办法.....	208	附录一 金属材料及热处理实验指导书 .....	224
四、热处理方案的选择和其技术条件		附录二 国外钢的牌号编法简介及国内外	
的标注 .....	209	常用钢牌号对照表 .....	232
1. 热处理方案的选择.....	209	附录三 洛氏硬度与其它硬度和强度换算	
2. 技术条件的标注.....	209	表 (GB1172-74).....	238
五、工艺路线的合理安排 .....	211	参考文献 .....	242



## 绪 论

金属材料是现代农业、工业、国防及科学技术的重要物质基础，各种机器和设备都需要使用大量的金属材料。据统计，目前机械工业部门所用的材料中，金属材料占90%以上。

机械工业广泛使用金属材料，是由于它不但具有优良的机械、物理和化学性能，能满足各种设计和使用的要求，而且还由于它具有优良的工艺性能，易采用各种加工方法制成各种形状零件和工具。不但如此，采用热处理还可改变金属表面的化学成分和内部结构，以满足各种不同的使用要求。

在机械制造业中，正确运用热处理方法，能够挖掘材料的潜力，提高产品质量，减轻重量，降低成本，延长寿命，因而热处理在机器制造业中占有十分重要的地位。

人类所用材料的发现和发明，大大推动了社会生产力的发展，因此材料成了文明社会进步的标志。根据人类使用材料的进展，历史学家把人类社会的发展阶段分为石器时代、铜器时代和铁器时代。

人类大约从公元前二千五百年进入青铜器时代，是人类使用金属材料的第一个里程碑。但只是在进入了铁器时代人们把铁作为武器和工具后，经济和生活方式才发生了巨大变化，人类社会才进入了称得起文明的时代。假如没有铁，既发明不了蒸汽机，更谈不上近代文明。目前，钢铁仍然扮演着重要角色，但其它材料如高分子、陶瓷和复合材料，也获得巨大发展。

中国是世界文明发展最早国家之一。远在距今四千至三千年之间的夏朝，就掌握了青铜冶铸技术，考古学家在夏代文化遗址发现了青铜渔、猎工具及饮酒器等。爵（见图）是我国发现的最早青铜酒器，它的朴素而清秀的青绿色泽，可看作是世界文化史上辉煌灿烂的中国古代青铜文明的曙光。在商、周时代（公元前十六世纪~公元前十一世纪）就出现了高度发达的青铜文化。在春秋战国时代我国铸冶技术就逐步发展，制造出《干将》、《莫邪》等著名宝剑，并且掌握了生铁冶炼技术；在欧洲，这种方法直到十八世纪中叶才在英国出现。青铜组成元素的六种配比的“六齐”规律，是世界上最早的合金工艺总结。早在二千多年前我们就采用淬火、渗碳等热处理工艺。秦汉以后我国的冶铸和热处理技术达到了很高水平。1980年12月，

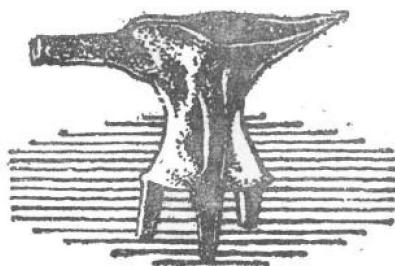


图 0-0

在秦始皇陵发掘的两乘彩绘铜车马的造型适度，体态匀称，解剖机理考究，异常传神，反映了当时冶金造型艺术的高超水平。但由于封建制度，特别是近百年来帝国主义的侵略和压迫，阻碍了我国各种科学和技术的发展，使我国的科学和技术在解放前处于极为落后的状态。

建国以来，在金属材料和热处理方面取得了巨大成就，建立了符合我国资源的合金钢系统，研制出具有世界水平的稀土镁球墨铸铁，许多热处理新工艺、新技术正在应用和逐步推广，各种有色金属和特殊性能合金在质量和品种上已经逐步满足了国防和科学技术的需要。

本课程是研究金属和合金的成分、组织与性能间的关系和变化规律的科学，而热处理实

实际上是通过改变组织或表面化学成分使金属和合金的性能满足生产要求或使用要求的一种加工工艺。学习这门课程的主要目的，是使学生具有合理选材、正确运用热处理方法、妥善安排工艺路线等方面的初步能力。设计机械零件时，如何选材，怎样改善材料的性能，采取何种制造工艺，都需要金属材料及热处理的知识。

这门课程的内容包括金属学、热处理和金属材料三部分，它是一门从生产实践中发展起来，而又直接为生产服务的技术基础课，具有丰富的理论性和实践性。虽然材料种类繁多，材料性能又千变万化，而且本课程名词多、概念多，又较抽象，入门比较难。但只要弄清楚重要的名词、概念和基本理论，按成分、工艺、组织、性能这一规律进行学习和记忆，注意理论和实践的联系，认真完成习题、作业和实验等教学环节，还是不难学好这门课程的。

近三十年来，由于机器制造，特别是宇航、原子能、电子等工业的发展，只用金属材料满足不了近代技术要求，还需大量使用非金属材料以及复合材料。关于这些知识，已超出本课程的范围。同学们可在学习本门课程的理论基础上，结合工作，根据需要进一步扩展自己的知识。

# 第一章 金属的机械性能

为了研究金属及合金的性能、组织、成分之间的关系及正确和合理使用材料，必须了解有关金属材料各种性能的基本概念。

可以把金属材料的各种性能分为使用性能和工艺性能。使用性能包括机械性能（如强度、塑性及韧性等）、物理性能（如电性、磁性及热性能等）、化学性能（如耐腐蚀性及抗高温氧化性）。工艺性能则随制造工艺不同分为可锻性、铸造性、焊接性及切削加工性等。

机械性能是设计和制造零件最重要的指标，也是控制材料质量的重要参数。每种金属材料，除了应对其成分范围作规定外，还应对其机械性能指标作出必要的规定。制造各类构件的原材料都应满足规定的性能指标。

## 一、强度指标

使用中一般多用拉伸试验法来测定金属材料的强度和塑性指标。低碳钢试棒的拉伸过程具有典型意义。将拉伸试棒（图 1-1）放在拉伸试验机上拉伸，便可获得图 1-2 所示的外力-变形量关系曲线，通常称为拉伸曲线。在拉伸曲线上可以确定以下性能指标。

### 1. 弹性极限

从图 1-2 可以看出， $0e$ 段是直线。拉伸试验的这一阶段，试棒变形量  $\Delta l$  与外力  $P$  成正比。当去除外力后，试棒恢复到原来尺寸。我们称这一阶段的变形为弹性变形。载荷  $P_e$  是试样发生最大弹性变形的载荷。弹性极限用  $\sigma_e$  表示，即

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0} \quad (\text{Pa}) \ominus$$

式中  $F_0$  是试棒原始截面积。

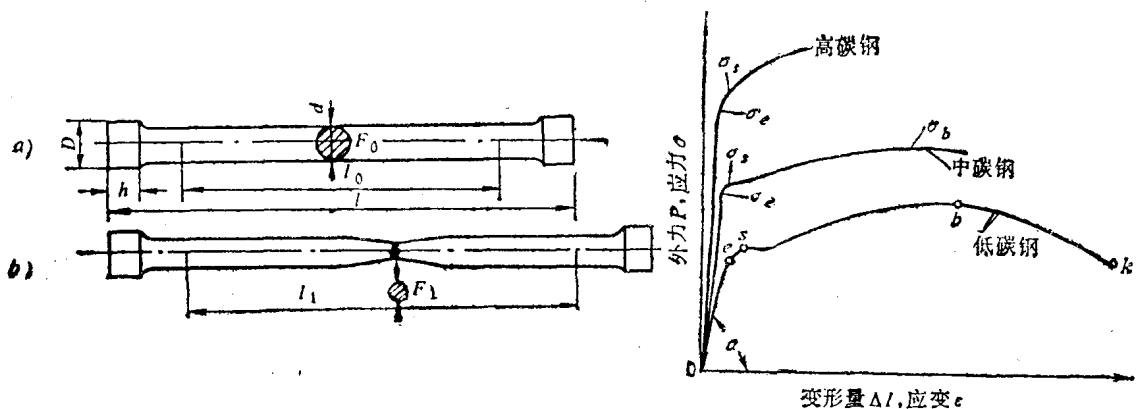


图1-1 钢的标准拉伸试棒

a) 拉断前 b) 拉断后

图1-2 退火低碳、中碳和高碳钢的拉伸曲线

(外力  $P$ -变形量  $\Delta l$  曲线与应力  $\sigma$ -应变  $e$  曲线形状相似，只坐标不同)

⊖ 与工程单位  $\text{kgf}/\text{mm}^2$  的关系：  $1 \text{ Pa} (\text{N}/\text{m}^2) \approx 10^{-7} \text{ kgf}/\text{mm}^2$ ，  $1 \text{ MPa} \approx 10^{-1} \text{ kgf}/\text{mm}^2$ 。

弹性极限  $\sigma_e$  是由试验得到的, 其值受测量精度影响很大, 通常采取残留变形量为 0.005~0.03% 时的应力为弹性极限。

## 2. 屈服强度

从拉伸曲线上可以看到, 当载荷增加至超过  $P_e$  后, 试样发生塑性变形, 外力达到  $P_e$  时曲线出现一个小平台。此平台表明不增加载荷试样继续变形, 好象材料已经失去抵抗外力能力而屈服了。我们称试样屈服时的应力为材料的屈服强度或屈服极限, 以  $\sigma_e$  表示。 $\sigma_e$  表示金属抵抗少量塑性变形的应力, 为

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0} \quad (\text{Pa})$$

很多金属材料, 如大多数合金钢、铜合金以及铝合金的拉伸曲线不出现平台, 脆性材料如普通铸铁、镁合金等, 甚至断裂之前不发生塑性变形, 因此工程上规定试样发生某一微量塑性变形 (0.2%) 时的应力作为该材料的屈服强度, 称为条件屈服强度, 并以符号  $\sigma_{0.2}$  表示。要求严格时也可规定为 0.1%、0.05% 的变形量, 并相应以符号  $\sigma_{0.1}$ 、 $\sigma_{0.05}$  表示。

## 3. 抗拉强度

试样在屈服时, 由于塑性变形产生加工硬化<sup>⊖</sup>, 所以只有载荷继续增大, 变形才能继续增加, 直到增到最大载荷  $P_b$ 。拉伸曲线的这一阶段, 试样沿整个长度均匀伸长, 当载荷达到  $P_b$  后, 试样就在某个薄弱部分形成“细颈”, 如图 1-1 b) 那样。此时不增加载荷试样也会发生断裂。 $P_b$  是试样承受的最大外力, 相应的应力即为材料的抗拉强度, 又称为强度极限, 代表金属材料抵抗大量塑性变形的能力, 即

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0} \quad (\text{Pa})$$

材料的  $\sigma_{0.2}$  (或  $\sigma_e$ )、 $\sigma_b$  均可在材料手册或有关文献或资料中查得, 但  $\sigma_e$  在手册中很少列出, 因为测量  $\sigma_e$  手续麻烦, 而且需要十分精确的设备, 只有在特别需要时才测定它。

一般, 机器构件都是在弹性状态下工作的, 不允许微小的塑性变形, 所以在机械设计时应采用  $\sigma_e$  或  $\sigma_{0.2}$  强度指标, 并加上适当的安全系数。不过强度  $\sigma_b$  测量较方便, 而且数据也较准确, 所以设计零件时有时也可以直接采用强度指标  $\sigma_b$ , 但需使用较大的安全系数。

由上述可知, 强度是表征金属材料抵抗过量塑性变形或断裂的物理性能。

$\sigma_e/\sigma_b$  的比值称为屈强比, 是一个有意义的指标。比值越大, 越能发挥材料的潜力, 减小结构自重。但为了使用安全, 亦不宜过大, 适合的比值在 0.65~0.75 之间。

## 4. 弹性模量

材料在弹性范围内, 应力  $\sigma$  和应变  $\varepsilon$  服从虎克定律:  $\sigma = E \cdot \varepsilon$  或  $\tau = G\gamma$ <sup>⊖</sup>。式中  $\sigma$  和  $\tau$  分别为正应力和切应力,  $\varepsilon$  和  $\gamma$  分别为正应变和切应变 (应变为单位长度的变形量, 即  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ )。

因之  $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$  或  $G = \frac{\tau}{\gamma}$ , 相应为正弹性模量和切弹性模量。由图 1-2 可以看出, 弹性模量  $E$  是拉伸曲线上的斜率。即  $\text{tg} \alpha = E$ 。斜率  $\text{tg} \alpha$  越大, 弹性模量  $E$  也越大, 即是说弹性变形

⊖ 关于塑性变形和加工硬化现象, 将在第三章讨论。

⊖  $G$  由扭转试验测得, 称为切变弹性模量。

越不容易进行。因此  $E$ 、 $G$  是表示材料抵抗弹性变形能力和衡量材料“刚度”的指标。弹性模量越大，材料的刚度越大，即具有特定外形尺寸的零件或构件保持其原有形状与尺寸的能力也越大。

弹性模量的大小主要决定于金属键，与显微组织的关系不大。合金化、热处理、冷变形等对它的影响很小。生产中一般不考虑也不检验它的大小，基体金属一经确定，其弹性模量值就基本上定了。在材料不变的情况下，只有改变零件的截面尺寸或结构，才能改变它的刚性。

在设计机械零件时，要求刚度大的零件，应选用具有高弹性模量的材料。钢铁材料的弹性模量大，所以对要求刚度大的零件，通常选用钢铁材料，例如镗床的镗杆应有足够的刚度，如果刚度不足，当进刀量大时镗杆的弹性变形就会大，镗出的孔就会偏小，因而影响加工精度。

要求在弹性范围内对能量有很大吸收能力的零件（如仪表弹簧），一般使用软弹簧材料铍青铜、磷青铜制造，应具有极高的弹性极限和低的弹性模量。

在表 1-1 中列出的是常用金属的弹性模量。

表 1-1 常用金属弹性模量

金 属	$E$ (MPa)	$G$ (MPa)
铝 (Al)	72000	27000
铜 (Cu)	121000	44000
银 (Ag)	80000	27000
铁 (Fe)	214000	84000
镁 (Mg)	45000	18000
镍 (Ni)	210000	84000
钛 (Ti)	78700	

## 5. 疲劳强度

某些机器零件，如轴、弹簧、齿轮、叶片等，在交变载荷长期作用下，很多情况是在工作应力峰值低于弹性极限的情况下突然破坏的。在多次交变载荷作用下的破坏现象，称为疲劳。交变载荷可以是大小交变、方向交变，或同时改变大小和方向。

金属材料的疲劳破坏过程，是首先在其薄弱地区，如在应力集中或缺陷（划伤、夹渣、微小裂纹等）处产生微细裂纹。这种裂纹是疲劳源，而且一般出现在零件表面上，形成疲劳扩展区。当此区达到某一临界尺寸时，零件就在甚至低于弹性极限的应力下突然脆断。最后的脆断区称为瞬时破坏区。图 1-3 a) 是典型疲劳断口（汽车后轴）的宏观照片，而图 1-3 b) 是典型断口三个区域的示意图①。

测定材料的疲劳强度时，要用较多的试棒，在不同交变载荷下进行试验，作出疲劳曲线，如图 1-4 所示。从图可以看出，循环数增加，应力降低。当应力降到某一值后，曲线变成水平直线，这就意味着材料可以经受无限次循环载荷而不发生疲劳断裂。把试样承受无限次应力循环或达到规定的很多次循环仍不断裂的最大应力，作为材料的疲劳强度。对在弯曲循环载荷下测定的疲劳强度用符号  $\sigma_{-1}$  表示，而在剪切循环载荷下测定的用  $\tau_{-1}$  表示。

- ① 可以看出疲劳断口的特征是：① 疲劳断口是非常光滑和细洁区域。② 疲劳断口扩展区域出现弧形贝纹，这些弧形贝纹是裂纹以疲劳源为中心逐步扩展的痕迹，不过有些情况看不到明显的贝纹区，而是出现细晶状光滑区域。这是由于裂纹在扩展过程中，随着交变载荷循环反复张开和合拢，表面相互摩擦的结果。③ 瞬间破坏区域，对韧性材料有剪切唇出现，但脆性材料的断口呈粗晶状。

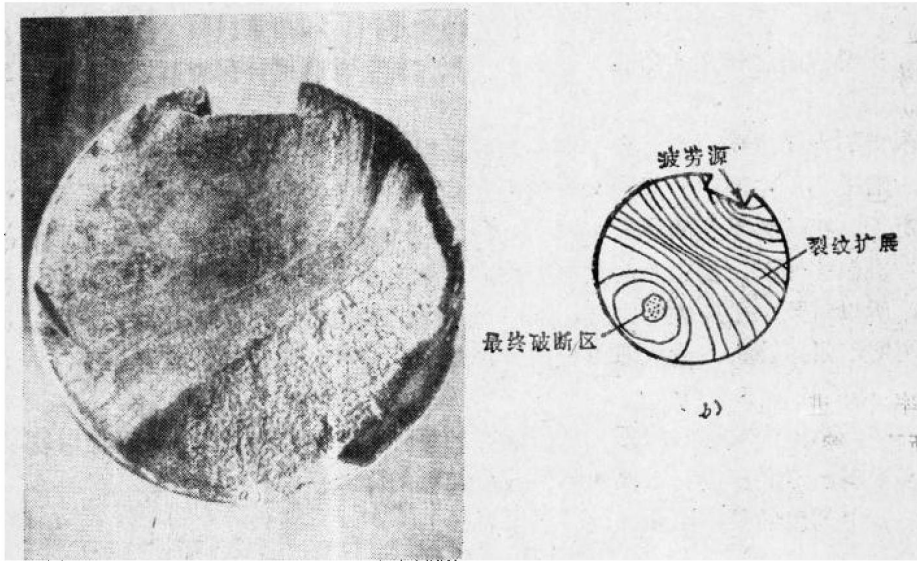


图1-3 疲劳断口的特征  
a) 汽车后轴的断口 b) 断口示意图

图1-4是钢铁材料的疲劳曲线，在试验循环数达到 $10^7$ 次时，出现水平直线。所以对于钢铁材料，把循环数达到 $10^7$ 次时的最大应力作为疲劳强度。有色金属和合金的疲劳曲线不出现水平直线，因此工程上规定循环数到 $10^8$ 次时的最大应力作为它们的疲劳强度。

材料的 $\sigma_{-1}$ 与 $\sigma_s$ 是紧密相关的，对钢来说其关系为经验公式 $\sigma_{-1} = 0.45 \sim 0.55 \sigma_s$ 。可见材料的疲劳强度随其强度极限增高而增高。

根据疲劳的特点和总的循环次数，可以分为高周疲劳( $N \geq 10^4$ )和低周疲劳( $N \leq 10^4$ )。高周疲劳时，重要的性能是疲劳强度。如果零件的工作应力低于材料的疲劳强度，则在理论上不会发生疲劳断裂。而低周疲劳时，材料的疲劳抗力不仅与强度有关，而且与塑性有关，即材料应有良好的强韧性配合。

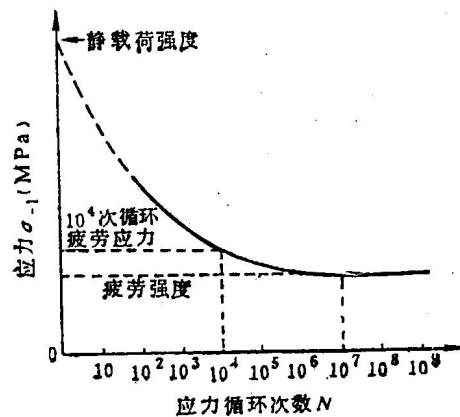


图1-4 疲劳曲线

零件的疲劳强度除了决定于材料的成分及其内部组织外，与零件的表面状态及其形状也有很大的影响。表面应力集中(划伤、损伤、腐蚀斑点等)均使疲劳寿命大大减低。提高零件疲劳寿命的方法是：(1)设计上减小应力集中，转接处避免锐角连接，使零件具有较细的表面粗糙度；(2)强化表面，如渗碳、氮化、喷丸、表面滚压等，在零件表面造成残余压应力，抵消一部分拉应力，降低零件表面实际拉应力峰值，从而提高零件的疲劳强度。

## 二、塑性指标

塑性是指金属材料在载荷作用下产生塑性变形(永久变形)而不破坏的能力。评定材料

塑性的指标通常是延伸率和断面收缩率。

### 1. 延伸率

延伸率用下式确定：

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中  $l_0$  为试棒原标距长度； $l_1$  为拉断后试棒的标距长度（图 1-1）。

在材料手册中常常可以看到  $\delta_5$  和  $\delta_{10}$  两种符号，它分别表示用  $l_0 = 5d$  和  $l_0 = 10d$ （ $d$  为试棒直径）两种不同长度试棒测定的延伸率。 $l_1$  是试棒的均匀伸长和产生细颈后伸长的总和，很明显，相对来说短试棒中细颈的伸长量所占的比例大。故同一材料所测得的  $\delta_5$  和  $\delta_{10}$  值是不同的， $\delta_5$  的值较大，而  $\delta_{10}$  值较小，例如钢材的  $\delta_5$  大约为  $\delta_{10}$  的 1.2 倍。所以相同符号的延伸率才能进行相互比较。

### 2. 断面收缩率

断面收缩率  $\psi$  用下式求得：

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$$

式中  $F_0$  为试棒原来的截面； $F_1$  为试棒拉断后细颈处的截面积（图 1-1）。断面收缩率不受试棒标距长度的影响，因此能更可靠反映材料的塑性。

必须承受强烈变形的材料，塑性指标具有重要的意义。塑性优良的材料冷压成形性好。此外，重要的受力零件也要求具有一定塑性以防止超载时发生断裂。

延伸率和收缩率也表明材料在静态或缓慢增加的拉伸应力下的韧性。不过在很多情况下，具有高收缩率的材料可承受高的冲击功。

必须指出，塑性指标不能直接用于零件的设计计算，只能根据经验来选定材料的塑性。一般来说，延伸率达 5% 或断面收缩率达 10% 的材料，即可满足绝大多数零件的要求。

但对各种具体形状、尺寸和应力集中系数的零件来说，对塑性的要求是有一定限度的，并不是越大越好，否则会限制材料强度使用水平的提高，不能发挥材料强度的潜力，造成产品粗大笨重、浪费材料和使用寿命不长。

## 三、韧性指标

### 1. 冲击韧性

实践证明，金属材料在冲击载荷作用下的情况同静载荷作用下的情况完全不同。因此前面所述机械性能指标不能反映材料受突然载荷，即冲击载荷时的性能。机器零件在工作过程中往往受到冲击，如在发动机起动或改变速度时；飞机的起落架在着落时，都要受到冲击载荷。因此有必要测定材料在受冲击载荷时所表现的性能。这种性能通常用冲击功  $A_k$  或冲击值  $\alpha_k$  来评定。

目前普遍采用弯曲冲击试验法测量材料的  $A_k$  或  $\alpha_k$ ，在图 1-5 a) 所示的摆锤式冲击试验机上进行。图 1-5 b) 为常用的标准冲击试样。试验时把试样放在试验机的机座上，落下摆锤，从试样槽口背面冲击试样。在刻度盘上读出摆锤打断试样所消耗的能量，称为冲击功，以  $A_k$  表示，单位为 J。 $A_k$  值的大小表示材料韧性的高低，但我国习惯上仍然采用冲击值  $\alpha_k$ ，

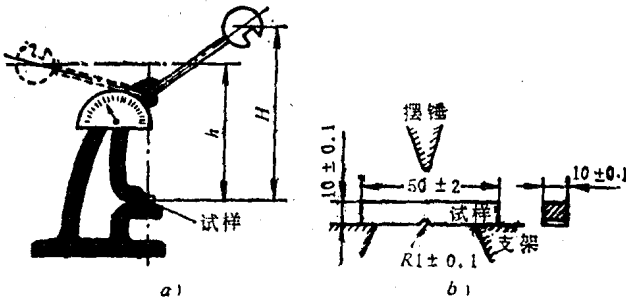
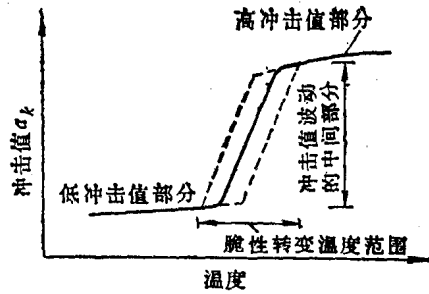


图1-5 冲击试验方法的示意图

图1-6 温度对 $\alpha_k$ 值的影响

用下式计算：

$$\alpha_k = \frac{A_k}{F} (\text{J}/\text{cm}^2) \ominus$$

式中  $F$  为槽口处截面的面积 ( $\text{cm}^2$ )。

研究证明， $\alpha_k$  值不仅与材料的成分及内部组织有关，而且和试验条件（试样尺寸及温度等）有关。当试验条件改变时， $\alpha_k$  值有较大的变化。同一材料，如果试样的尺寸和缺口形状、深度不同，测得的  $\alpha_k$  值也不相同。不同条件下测定的  $\alpha_k$  值不能进行比较。为确保试验结果，试样一般不少于三个。

温度对冲击韧性的影响，如图 1-6 所示。此图是低、中等强度钢的  $\alpha_k$  值与试验温度的关系。从图中可以看出，在某一温度范围材料  $\alpha_k$  值突然下降。这种现象说明材料在某一温度范围从塑性状态转变为脆性状态。技术上规定把冲击韧性发生突然下降时所对应的温度作为材料的“冷脆转化温度”  $T_k$ 。此温度越低，表征材料的低温冲击韧性越好，可用来作低温下用的受力零件。对于大型金属结构，如储气罐、船体、桥梁、输送管道等，都要对钢材的脆性转变温度，以及在最低使用温度下应具有最低韧性值作出规定。

脆性转变温度随测定方法、试样的尺寸等不同而异。脆性转变温度只能用于对比不同材料在相同试样条件下的脆性倾向。实际构件比标准试样的脆性转变温度要高得多，即冷脆倾向更大。

在工程上，对承受不同载荷零件，要求具有一定的  $\alpha_k$  值，以保证零件使用安全，避免突然脆断。但  $\alpha_k$  值不能直接用于零件的计算，只有根据实践经验确定。一般说来，在室温下使用时承受冲击的零件，其  $\alpha_k$  值要高些。对一般零件，通常要求  $\alpha_k = 29 \sim 49 \text{ J}/\text{cm}^2$ 。

冲击试验对材料内部组织及存在的缺陷较其它方法更为敏感，即使内部组织结构存在微小差异也能反应出来，因此生产科研上常用来检查材料品质和工艺质量，如组织的均匀性、白点、裂纹、回火脆性、晶粒大小等。

## \*2. 断裂韧性

在传统的工程设计中，是只要构件的工作应力  $\sigma$  不超过许用应力  $[\sigma]$ ，即  $\sigma \leq [\sigma]$ ，就能保证构件在使用过程中不会发生塑性变形，更不会断裂。然而事实并非如此，高强度材料的零件有时会在应力远低于屈服强度的状态下发生脆性断裂。中、低强度材料的重型及大型结构也有这种断裂发生。

从长期生产实践中认识到，上述强度条件仅能保证零件不发生塑性变形及随后的韧性断

⊖ 与一般采用单位  $\text{kgf} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$  的关系为：  $1 \text{ J}/\text{cm}^2 \approx 0.1 \text{ kgf} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$ 。



裂。为了防止脆性断裂，还需对材料的  $\delta$ 、 $\psi$ 、 $a_k$  和冷脆转化温度提出一定要求。当然，强度条件并辅之以塑性、冲击值和冷脆转化温度这一办法，对保证机器可靠运行，确实起重要作用。

但是上述办法仍有不妥之处，因对于各种具体工作条件的零件，究竟  $\delta$ 、 $\psi$ 、 $a_k$ 、 $T_k$  值要求多大，无法计算，只能凭经验确定。往往会造成对中、低强度材料的中、小截面零件，为保证安全而对上述指标要求过高，降低强度水平，设计零件粗大笨重，造成浪费；另一方面，对高强度钢和大型结构，尽管在设计时曾保证了足够的延伸率和韧性，但在低应力下也不断发生脆断事故。如飞机零件的断裂，高压容器的爆炸，桥梁、船舶、大型轧辊及发电机转子的突然折断等。

为了解决这个问题，以提高材料的强度使用水平和扩大其应用范围，保证机器运转安全可靠，最近发展了一门新的学科——断裂力学。

大量事实说明，低应力脆性断裂是由材料中存在裂纹扩展而引起的。在冶炼、轧制、热处理等制造过程中，不可避免会在材料内部引起某种显微裂纹，但又未被无损探伤发现。这些小裂纹在外力作用下由于尖端应力集中、疲劳、腐蚀、辐照等原因发生扩展。当裂纹扩展到所谓的临界尺寸时，零件便突然断裂。

为了研究裂纹对脆性断裂的影响，是将高强度材料的试样表面制成不同深度的表面裂纹，然后分别进行拉伸试验，并绘制成图 1-7 所示的断裂强度与裂纹深度的关系曲线。此关系曲线可以用式  $K = \sigma_c \sqrt{a}$  表示。式中  $\sigma_c$  为材料的断裂强度； $a$  为裂纹深度； $K$  为材料系数。从图上曲线可以看出，裂纹材料的断裂强度  $\sigma_c$  决定于裂纹深度  $a$ ，但不管  $\sigma_c$  和  $a$  如何变化，对一定的材料  $K$  是一个常数。可见  $K$  可作为材料的一种机械性能指标，在工程上称为断裂韧性。由上可知，断裂韧性是材料抵抗裂纹开始扩展（失稳）能力的指标。

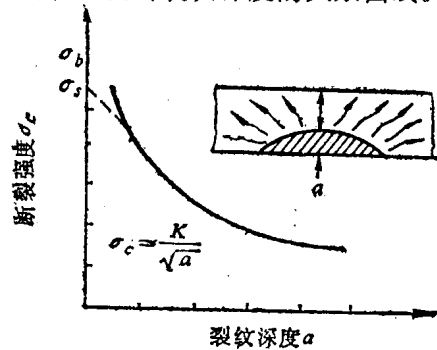


图 1-7 断裂强度与裂纹深度的关系曲线 (示意图)

在实际情况下，由于裂纹前端的应力状态和裂纹扩展的方式不同，材料抵抗裂纹扩展能力也是不同的。一个存在缺口或裂纹的试样（图 1-8 a），拉伸时缺口或裂纹的尖端由于应力集中或变形约束，应力状态有二种情况。

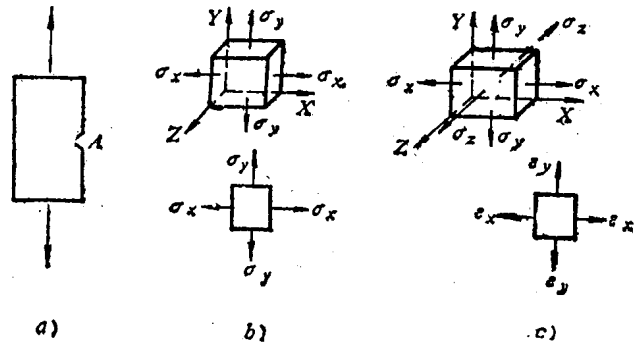


图 1-8 裂纹尖端应力状态的示意图  
a) 试样 b) 平面应力状态 c) 平面应变状态

如果试样是一块很薄平板，则裂纹尖端处  $A$  的应力状态为如图 1-8 b) 所示，沿  $Z$  轴方向的变形基本不受约束，可自由变形。这时该方向的应力  $\sigma_z = 0$ ，但应变  $\epsilon_z \neq 0$ 。这样试样尖端  $A$  处在  $X$ 、 $Y$  方向应力不等于零，是二维的，称这种