

金属材料热处理



大连工学院
金相教研室编
辽宁人民出版社

金属材料及热处理

大连工学院金相教研室编

*

辽宁人民出版社出版

(沈阳市南京街6段1里2号)

辽宁省新华书店发行

沈阳新华印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 22 1/2

字数: 469,000 印数: 1—15,000

1981年9月第1版 1981年9月第1次印刷

统一书号: 15090·97 定价: 1.80元

前 言

金属材料是材料科学的重要内容之一，是机械制造工业的基础。金属材料及其热处理，是机械制造类冷加工专业所必修的一门技术基础课。

根据工科院校机械类冷加工专业《金属材料及热处理》教学大纲的要求，结合多年来对机械制造及工艺、船舶内燃机、化工机械、起重运输机械等专业的教学实践，我们编写了这本《金属材料及热处理》教学用书。编写过程中，考虑到冷加工各专业工程技术人员的需要，我们注意介绍了各类金属材料的特性、应用及选材原则，并着重分析了各种热处理方法及其他强化方法的特点。

本书编写过程中，得到了许多单位和同志的大力支持和热情帮助。哈尔滨工业大学、东北工学院、沈阳机电学院、沈阳拖拉机厂、大连铁道学院、大连机床厂、大连化工厂等单位参加了本书的审稿会，根据代表们提出的意见，本书作了补充和修改；书中引用和参考了许多单位的技术资料，大连机床厂提供了本书第八章的初稿。在此一并致谢。

本书第一、三、四、十章由曹智本编写，第二、五、六章由崔朝令编写，第七、八、九章由栗振域编写。由于水平所限，错误和不足在所难免，希望读者提出宝贵意见。

编 者

1981年1月

内 容 提 要

全书分十章，前七章为金属材料基本理论和常用金属材料，内容包括：金属学基础、钢的热处理、碳钢、合金钢、铸铁、非铁金属及粉末冶金材料、金属材料的选用等；后三章为专业用金属材料，结合机床、内燃机、石油化工等专业的实际，说明了选择材料以及安排零件制造工艺路线的方法。

本书可作为大专院校、职工大学等冷加工专业教学用书，也可供机械制造工程技术人员阅读参考。

本书由大连工学院曹智本、崔朝令、栗振域编写。

目 录

第一章 金属材料的基本理论	1
一、金属材料的机械性能指标.....	1
二、金属材料的组织结构与性能的关系.....	9
三、金属的晶体结构.....	13
四、金属的结晶过程及理论.....	18
五、合金的晶体结构.....	23
六、二元合金状态图.....	28
七、铁碳合金状态图.....	41
八、金属及合金的塑性变形与再结晶.....	50
第二章 钢的热处理	64
一、钢的热处理一般概念.....	64
二、钢在加热时的组织转变.....	64
三、钢在冷却时的组织转变.....	67
四、钢的退火及正火.....	83
五、钢的淬火及回火.....	87
六、控制气氛热处理和真空热处理.....	102
七、形变热处理.....	107
八、钢的表面热处理.....	110
九、钢的化学热处理.....	114
第三章 碳钢	135
一、钢铁生产与钢材质量.....	135
二、碳钢.....	144
第四章 合金钢	159
一、合金钢概论.....	159
二、合金结构钢.....	167
三、合金工具钢.....	185
第五章 铸铁	199
一、铸铁的特点.....	199

二、Fe-C状态图和 Fe-C-Si 状态图	201
三、铸铁的石墨化过程	203
四、灰铸铁	203
五、可锻铸铁	209
六、球墨铸铁	211
七、耐磨铸铁	219
八、耐蚀铸铁	220
九、耐热铸铁	222
第六章 非铁金属及粉末冶金材料	223
一、铝及其合金	223
二、钛及其合金	236
三、铜及其合金	251
四、滑动轴承合金	261
五、粉末冶金材料	265
第七章 机械零件材料的选用	276
一、金属材料强度在机械设计与制造中的作用	276
二、金属材料选用的一般原则	278
三、热处理技术条件的制定	279
四、零件结构的热处理工艺性	283
五、冷、热加工工艺路线的安排	285
六、零件热处理变形允差范围	285
七、金属材料的切削加工性	287
第八章 机床零件材料及热处理	290
一、机床零件材料的特点	290
二、机床主要零件材料及热处理	290
第九章 内燃机零件材料及热处理	306
一、内燃机零件材料的特点	306
二、内燃机主要零件材料及热处理	306
第十章 石油化工用不锈钢与耐热钢	316
一、金属腐蚀的基本概念	316
二、化学腐蚀	317
三、电化学腐蚀	321
四、耐酸不锈钢	325
五、耐热钢	342

第一章 金属材料的基本理论

一、金属材料的机械性能指标

金属材料的机械性能指标是设计者选用金属材料的最主要依据。

金属材料的机械性能指标有多种，目前广泛使用的有刚度和弹性、强度和塑性、硬度、冲击韧性、断裂韧性等。本节将具体讨论这些机械性能指标的宏观物理现象、简单的检验方法以及选用这些方法的原则。

(一) 塑性材料的拉伸曲线

材料在使用过程中总是要受到外力的作用，材料在外力作用下所发生的形状和尺寸的变化称作变形。变形有两种情况，一种为弹性变形，即变形的大小与外力成正比，外力消除，变形也消失，材料恢复原状；另一种为塑性变形，即变形大小与外力不成正比，外力消除，变形不会完全消失。过量的塑性变形，就会发生断裂。

金属材料能够产生塑性变形，是它不同于其他材料的优良性能之一。

为了了解金属材料在外力作用下发生弹性变形、塑性变形以致断裂的规律，下面我们讨论塑性材料在外力作用下，外力与变形的关系。

按照 GB228—63（金属拉力试验法）中的规定，将退火低碳钢制成如图 1—1 中所示的拉伸试棒，其中 d_0 为试棒直径， L_0 为用来测量伸长的规定长度，称为标距（标距有两种，即 $L_0 = 10d_0$ 或 $L_0 = 5d_0$ ）。将拉伸试棒装在拉伸试验机上，开动机器后，试棒就受到一个自零渐增的拉力 P ，并相应产生一个伸长变形 ΔL ，直到试棒被拉断为止。

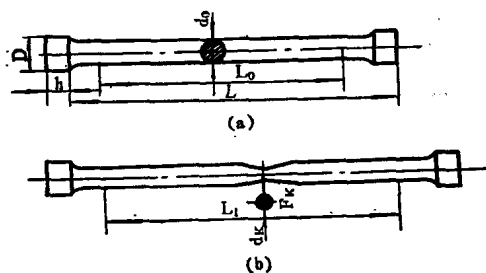


图1—1 钢的拉伸标准试棒(a) 和被拉断后(b)示意图

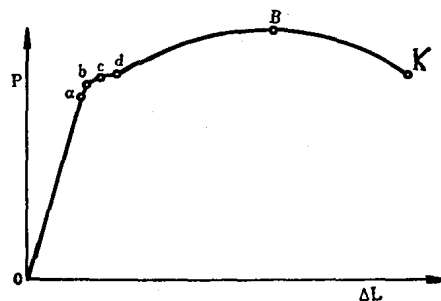


图1—2 塑性材料的拉伸图

试棒原标距拉断后的长度为 L_1 。以伸长量 ΔL 为横坐标，拉力 P 为纵坐标，画出如图 1—2 所示的 P （外力）—— ΔL （伸长）关系曲线，这种图叫拉伸图。

在工程上，为了消除试棒尺寸大小的影响，反映材料本身的性质，通常以试棒的横截面积 (F) 除拉力 (P)，即正应力 σ ($\sigma = \frac{P}{F}$) 作为纵坐标，试棒的相对伸长 ϵ ($\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$) 作为横坐标，作出 σ — ϵ 关系曲线，此图叫应力 (σ)——应变 (ϵ) 图。

由图 1—2 可以看出，在开始的 ob 阶段，金属材料处于弹性变形阶段。这阶段应力与应变成正比关系，这时如去掉外力，试棒仍可能恢复到原来的尺寸。

外加载荷超过 b 点时，金属材料除弹性变形外还发生部分塑性变形。载荷增至 c 点后，不继续增加载荷变形仍然进行，这种现象称为“屈服”，说明试棒开始塑性变形。

db 阶段，由 d 点继续加载，则沿试棒长度发生均匀而显著的塑性变形。

BK 阶段，载荷在 B 点达到最大值，此后逐渐降低，但变形仍在进行。至 B 点时试棒的试验长度内出现局部直径变细，这种现象称为“颈缩”，随后的变形主要局限于颈部，直至断裂。

根据拉伸图中应力—应变关系，可以得出几个常用的机械性能指标。

（二）刚度和弹性

1. 刚度（或称刚性）

材料在受力时抵抗弹性变形的能力称为“刚度”。

材料在弹性范围内，应力与应变的比值 ($\frac{\sigma}{\epsilon}$) 称为弹性模数 (E)，它相当于引起单位变形时所需要的应力。因此，弹性模数在工程技术上是衡量材料刚度的指标。 E 愈大（即刚度愈大），表示在一定应力作用下发生的弹性变形愈小。

弹性模数 E 主要决定于金属材料本身，与其他强化金属材料的手段（如热处理，合金化，冷热加工等）无关。所以弹性模数 E 是金属材料最稳定的性质之一。对钢来说，在室温下的弹性模数 E 大都在 $19000 \sim 22000$ 公斤/毫米² 范围之内。弹性模数随着温度的升高而逐渐降低。

机械零件和构件，在使用过程中绝大多数是处于弹性状态。很多零件和构件，在设计、选用材料时，往往将弹性模数 E 作为重要指标来考虑，如起重机桁架、船体、机床床身、镗床镗杆等。

2. 弹性

是指材料能够承受最大的弹性变形而尚未发生塑性变形时的应力。这个指标称为弹性极限 (σ_E 或 σ_e)，在图 1—2 中与 b 点相应的应力数值就是弹性极限。

比例极限，是代表金属材料应力与应变能保持直线关系时的最大应力值，常用符号 σ_p 表示。在图 1—2 中与 a 点对应的应力数值就是比例极限。

实际上,在拉伸图中,弹性极限 b 点是很难测定的,而且对大多数结构钢来说,比例极限与弹性极限的数值非常相近,所以一般弹性极限不测定,而以比例极限代替之。如确有需要测定 σ_E ,一般采用其残余变形量为0.001~0.05%时的应力作为弹性极限的标准。

(三) 强度与塑性

强度是材料在外力作用下抵抗塑性变形和断裂的特性。

1. 屈服极限 (屈服强度) σ_s

屈服极限是代表金属材料抵抗微量塑性变形时的应力,相当于拉伸图中刚刚开始发生屈服时的 c 点。对钢来说,只有低碳碳钢和低碳合金钢才有明显的屈服点,而在其他钢中是很难测量的。因此,在工程实践中,通常把变形量为拉伸试棒标准长度的 0.2% 时的应力值规定为条件屈服极限,常用 $\sigma_{0.2}$ 来表示。

2. 强度极限 (抗拉强度) σ_b

强度极限是代表金属材料能承受最大均匀塑性变形的应力,相当于拉伸图上的 B 点。由于破坏是在大量塑性变形之后发生的,所以,强度极限 σ_b 除直观的代表材料抵抗破坏抗力的大小之外,更确切地说,它是代表材料抵抗大量塑性变形的应力大小。这就是强度极限 σ_b 的物理意义。

在设计机械零件时,屈服极限 σ_s 是选用金属材料所依据的最重要的强度指标。比例极限 σ_p 有时也作为设计重要零件时主要考虑的强度指标。这两个指标都代表金属材料抵抗“微量”塑性变形的能力。

3. 塑性

金属材料的塑性是指材料在受力破坏以前可以承受最大的塑性变形的能力。

代表塑性的指标有二:

(1) 延伸率 δ

做拉伸试验用的试棒拉断后,其标距部分所增加的长度与原标距长度之比值,称为延伸率,即:

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中: L_0 ——拉伸试棒原始标距长度;

L_1 ——拉伸试棒破断后标距间长度。

(2) 断面收缩率 ψ

试棒拉断后,其拉断处横断面积和原始断面积之比值,称断面收缩率。即

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

式中: F_0 ——拉伸试棒原始截面积;

F_1 ——拉伸试棒破断后截面积。

式中各数值可由实验测得，在测定金属材料的拉伸强度时，可以同时测得它们的塑性指标。

对于同一材料，采用的试棒标距长度不同，所测定的延伸率 δ 的数值也不同。因此，在实用中对不同尺寸试样应标以不同的符号。例如：当采用标距长度为其直径 5 倍的标准试棒时，所测定的延伸率以 δ_5 表示；用标距长度与直径之比为 10 的试棒时，则以 δ_{10} 表示， δ_{10} 通常还写成 δ 。

δ 和 ψ 也能间接反映出材料的脆性倾向，一般认为： $\delta < 5\%$ 的材料是脆性材料。

(四) 硬度

硬度是指金属表面抵抗其他更硬物体压入的能力，也可以说是材料对局部塑性变形的抗力。测定硬度最常采用的方法是布氏硬度法和洛氏硬度法两种。

1. 布氏硬度法

布氏硬度试验通常是采用直径 10mm 淬火钢球，用 3000 公斤的载荷压入金属材料表面，经过规定的加载时间后卸除载荷，即得直径为 d 的压痕。载荷除以压痕表面积所得之值即为布氏硬度，以 HB 表示。见图 1—3。

计算公式为：

$$HB = \frac{P}{F} \text{ kg/mm}^2$$

因测量压痕深度 h (见图 1—3) 较为困难，而测量压痕直径 d 比较容易，因此可把 h 改用 d 表示：

$$F = \pi D \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

$$\text{所以 } HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

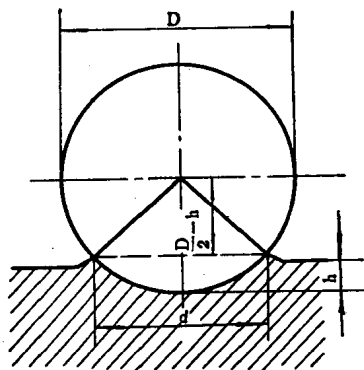


图1—3 计算布氏硬度压痕面积示意图

由于载荷 P 、钢球直径 D 是一定的，所以测出压痕直径 d 即可求出 HB 值。在实用中，根据 P 、 D 与 d 的关系可直接由硬度表中查得 HB 值。

在生产中，如采用的载荷 $P = 3000$ 公斤，钢球直径 $D = 10$ 毫米，则布氏硬度的表示方法可写成 D_{10}^{3000} ，例如 $D_{10}^{3000} = 3.2 \sim 3.4$ ，表示压痕直径是 3.2~3.4 毫米，查表可知 $HB = 321 \sim 364$ 。如果选用另一种载荷与钢球直径，则应注意换算。

布氏硬度法的测量误差小，试验数据比较稳定。布氏硬度与其他机械性能指标 (σ_b) 之间有下列近似关系：

退火状态的低、中碳钢 ($HB \approx 120 \sim 175$)， $\sigma_b \approx 0.36HB$

调质后的低、中碳钢 ($HB > 175$)， $\sigma_b \approx 0.34HB$

测量时应该注意,对于太薄或者加工后的零件,不允许有较大压痕,不宜采用布氏硬度法;在测量硬度较高的金属材料时($>HB450$),由于钢球变形难以测得精确数据,所以也不能采用布氏硬度法。

2. 洛氏硬度法

洛氏硬度法常用的试验条件是 120° 角的圆锥形金刚石压头和 $P=150$ 公斤载荷,其测量原理与布氏硬度法基本相同,但洛氏硬度值的测定是以试样被测点的压痕深度为依据的,压痕越深,硬度值越低。

硬度值刻在硬度计的表头上,测量时,可直接读出被测试样的硬度值。此法用于淬火后或其他硬度较高的零件,是生产中广泛应用的一种硬度测量方法。洛氏硬度值规定以符号 HR 表示,根据压头与载荷不同分别标 HRA、HRB、HRC。用 120° 金刚石锥压头和150公斤载荷的,一般称为 HRC。HRC 与 HB 的关系大约为 $1:10$,例如 HRC40 相当于 HB400 左右。但在 $HB < 220$ 的硬度范围内不能用这种方法换算。

HRB 是用直径为 $1/16$ 英寸(约为1.588mm)的淬火钢球压头和100公斤的载荷测得的洛氏硬度,用于测量退火钢、铸铁及有色金属等较软材料的硬度。

HRA 是用 120° 角的金刚石压头及60公斤载荷测得的洛氏硬度,压痕较小,用于测量硬而薄的零件,如硬质合金及很薄的淬火件的硬度。

洛氏硬度法,操作迅速、简便,生产率高,测量范围广,在零件表面上留下的压痕小,基本上不伤零件表面。但由于压痕小,若材料内部组织不均匀,有粗大的第二相组织(如铸铁中的石墨),则测量的硬度不准确。

此外,测量硬度的方法还有维氏硬度法 HV、肖氏硬度法 HS 以及显维硬度法等。

(五) 金属的疲劳

大多数机器零件是在重复或交变应力作用下工作的,如各种发动机曲轴、齿轮,各种滚动轴承等。金属材料在小于 σ_s 的重复交变应力作用下发生断裂的现象称为“金属的疲劳”。

材料所受重复或交变载荷应力(σ)与其断裂前的应力循环次数(N)有如图 1—4 所示的曲线关系。该曲线称为“疲劳曲线”或 $\sigma-N$ 曲线。从曲线可以看出,应力最大值 σ 愈低,则断裂前的循环次数 N 愈多。当应力降至某值后,疲劳曲线与横坐标轴平行,即表示在一定条件下当应力最大值低于某一定值时,材料可能经受无限次应力循环而仍不发生疲劳断裂。此应力值叫做“疲劳极限”。当应力循环对称时,用符号 σ_{-1} 表示之。对钢铁来说,如 N

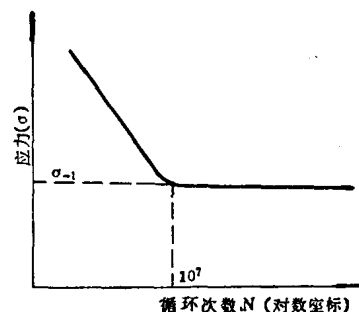


图1—4 疲劳曲线

达 $10^6 \sim 10^7$ 次仍不发生疲劳断裂,则可认为随着 N 的继续增加,将不会再发生疲劳断裂

了。因此可以采用 $N = 10^7$ 为基数，确定钢的疲劳极限。对于有色金属，一般则需规定应力循环次数在 10^8 或更多周次，才能确定其疲劳极限。

(六) 冲击韧性

前面讨论的只是在静载荷作用下的机械性能指标。但是，机器上的许多零件，例如柴油机上的连杆、曲轴、连杆螺钉等，在工作时承受的是周期性冲击载荷的作用。在设计这些零件时，如果仍只用强度和硬度这些静载荷作用下的指标来计算，将很难保证零件工作时的安全性。因此，还要考虑冲击韧性。

在工程实践中，冲击韧性是表征材料抵抗冲击载荷的作用而不被破坏的一种能力。冲击载荷不仅有力的作用，还有作用时的速度问题，所以冲击载荷是一个能量载荷。

目前，常用的冲击试验方法，是用 $10 \times 10 \times 55$ 毫米并带有缺口的试样，在摆锤冲击试验机上，测定一次冲断试样缺口处单位截面所消耗的功，以此来作为材料的冲击韧性指标。所得的数值称为冲击值，以 a_k 表示。

当重锤冲击试样时，重锤消耗在试样上的功为：

$$A = Q(H_0 - H_1) \text{ 公斤} \cdot \text{米}$$

冲击韧性 a_k 值以下式计算：

$$a_k = \frac{A}{F} = \frac{Q(H_0 - H_1)}{F} \text{ 公斤} \cdot \text{米/厘米}^2$$

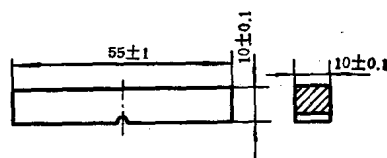


图1—5 冲击试样

式中： A ——冲断试样时，重锤所消耗的功（公斤·米）；

Q ——重锤重量（公斤）；

F ——试验前试样刻槽处的横断面积（厘米²）。

冲击试样有两种：一种是我们最常用的梅氏试样，试样尺寸及缺口形状如图1—5所示；另一种是夏氏冲击试样，其尺寸和缺口形状可查有关规定。

同一成分与同一热处理状态的试样，若采用梅氏试样或夏氏试样分别做试验时，冲击值 a_k 显然是不一样的。

我们在实际使用时， a_k （梅）用得最多，因此使用梅氏试样时一般不特别注明。只有对冲击韧性有特别要求时，才使用 a_k （夏），但使用时必须加以说明。

一般金属材料的 a_k 值，大致在下列范围内：灰铸铁、淬火的高强度钢 $a_k < 1$ 公斤·米/厘米²；未经淬火、回火的中碳钢 $a_k \approx 3 \sim 5$ 公斤·米/厘米²；淬火、回火后的碳钢与合金钢 $a_k \approx 5 \sim 15$ 公斤·米/厘米²。

由于工程中绝大多数零件，一般不会受到一次冲断试样时那样大的冲击能量的作用，所以用 a_k 表示冲击韧性不能反映材料实际受力情况。因此，金属材料的韧性指标，多用小能量多次冲击方法测定。测定结果可绘出 $A-N$ 关系曲线，即在一定的冲击能量(A)作用下与破断次数(N)之间的关系曲线。

(七) 断裂韧性

断裂力学是研究材料的断裂现象和断裂规律的科学。对于内部有裂纹的材料，如果仅应用前述的强度、冲击韧性等机械性能指标来设计零件和选择材料，就会发生严重的破坏事故。为此，断裂力学提出了一些新的强度和韧性指标，以解决零部件内存在裂纹情况下的安全和寿命问题。断裂韧性就是断裂力学中防止材料脆性断裂的抗力指标。

随着工程技术的发展，材料强度的使用水平越来越高，但在提高强度的同时，材料的韧性却要下降，这就增大了脆性断裂的倾向。因此，在材料的工作应力远低于屈服强度的情况下，零部件常发生脆性断裂现象。

试验研究证明，材料在温度降低、应力集中增加、载荷速度加大、处于交变载荷的情况下，有由韧性状态转化为脆性状态的趋势。

材料破断的起源点总是发生在一些缺陷、裂纹处，而低应力的脆性破坏往往就是由于这些缺陷、裂纹逐渐扩展所引起的。同时，断裂应力 (σ_c) 和裂纹长度或深度 a 之间存在着 $\sigma_c \propto \frac{1}{\sqrt{a}}$ 的关系。断裂力学运用弹性力学的分析方法，对裂纹尖端的弹性应力场

进行了研究，提出了一个描述裂纹尖端附近应力应变场强弱程度的力学参数——应力强度因子 K_I ，随着受载程度和裂纹尺寸的增加，应力强度因子 K_I 也逐渐增大。当 K_I 达到一定值，便发生失稳，裂纹自动扩张以致断裂。此时的力学参数 K_I 就成了材料的性能指标——断裂韧性。定量研究的结果发现：

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{a} \cdot \gamma$$

式中 σ ——外加应力；

a ——裂纹长度或深度；

γ ——与试样和裂纹几何形状有关的一个因子。

在一定的条件下（例如平面应变下），当 σ 或 a 增加，或是二者同时增加时，使 K_I 达到材料的极限值 K_{Ic} ，便可发生脆性断裂，于是就把 K_{Ic} 作为防止脆断的抗力指标。它的物理意义可以表达为：材料抵抗内部裂纹发生临界快速扩展的一种能力。这里说的快速扩展，是指裂纹的临界失稳扩展，也就是脆断。因此， K_{Ic} 就称为材料的断裂韧性，它是使材料发生脆性断裂的应力强度的极限值。

断裂韧性和传统的材料机械性能指标一样，是材料本身的一种力学性能，但它也有自己的特征。断裂韧性是一种强度和韧性的综合指标。这是因为在知道了材料的断裂韧性 (K_{Ic}) 和断裂应力 (σ_c) 之后，即可根据 $K_{Ic} = \sigma_c \cdot \sqrt{a} \cdot \gamma$ 的关系式，确定材料的临界裂纹尺寸 a 。反之，知道了 K_{Ic} 和 a 后，即能计算出产生脆性断裂所能承受的极限应力 σ_c 。

金属材料的 K_{Ic} ，可以通过不同的试验方法和理论计算来测定。但是，测定金属材料断裂韧性的试样不同于一般测定常规机械性能的试样，它有两个基本特点：

①试样在断裂试验前，必须预制疲劳裂纹，以求反应材料中存在裂纹的实际情况；

②断裂韧性的最小稳定性，是在平面应变条件下材料抵抗裂纹扩张的性能。

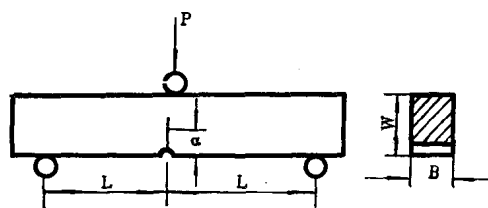
为此，试样厚度 B 、裂纹长度 a 和试样净断面宽度 $(w - a)$ 应满足如下要求：

$$B \geq 2.5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_s} \right)^2; a \geq 2.5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_s} \right)^2; w - a \geq 2.5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_s} \right)^2。$$

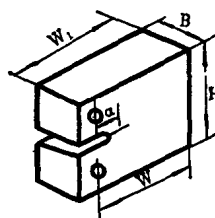
其中： K_{Ic} ——试样材料的断裂韧性；

σ_s ——试样材料单向拉伸时的屈服极限。

测定断裂韧性的试样类型有多种，目前已列为标准的有三点弯曲试样（图1—6a）和紧凑拉伸试样（图1—6b）两种。



(a) 三点弯曲试样



(b) 紧凑拉伸试样

图1—6 测定断裂韧性试样图

三点弯曲试样按下列公式计算：

$$K_{Ic} = \frac{P_Q S}{B W^{3/2}} f \left(\frac{a}{W} \right)$$

$$f \left(\frac{a}{W} \right) = 2.9 \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} - 4.6 \left(\frac{a}{W} \right)^{3/2} + 21.8 \left(\frac{a}{W} \right)^{5/2} \\ - 37.6 \left(\frac{a}{W} \right)^{7/2} + 38.7 \left(\frac{a}{W} \right)^{9/2}$$

紧凑拉伸试样按下列公式计算：

$$K_{Ic} = \frac{P_Q}{B W^{-1/2}} Y \left(\frac{a}{W} \right)$$

$$Y \left(\frac{a}{W} \right) = 29.6 \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} - 185.5 \left(\frac{a}{W} \right)^{3/2} + 655.7 \left(\frac{a}{W} \right)^{5/2} \\ - 1017.0 \left(\frac{a}{W} \right)^{7/2} + 638.9 \left(\frac{a}{W} \right)^{9/2}$$

式中： P_Q ——试样断裂或裂纹失稳扩张时的负荷（公斤）；

B ——试样的厚度（毫米）；

W ——试样的宽度（毫米）；

S ——试样的跨距（ $S = 4W$ 毫米）；

a——断裂时裂纹的平均长度（毫米）。

表1—1 是一些常用金属材料的断裂韧性 K_{Ic} 数据。

常用金属材料的断裂韧性

表1—1

材 料 牌 号	化 学 成 分						热 处 理	$K_{Ic}(\text{kg}/\text{mm}^{\frac{3}{2}})$
	C	Si	Mn	Ni	Cr	其 他		
40CrNiMo(4340)	0.40	0.33	0.68	2.33	0.89	0.29Mo	830°C油淬, 240°C回火	237
34CrNiMo	0.34	0.26	0.43	1.52	1.50	0.25Mo	850°C淬火, 240°C回火	296~317
18CrNiW	0.18	0.23	0.35	4.4	1.30	0.99W	950°C淬火, 650°C回火	415~437
34SiMnCrMoV	0.34	1.66	0.85		1.02	0.47Mo 0.15V	930°C淬火, 280°C回火	324
30SiMnCrMo	0.30	0.76	1.48		0.99	0.59Mo	930°C淬火, 520°C回火	409~436
34CrMoA	0.34	0.31	0.62		1.03	0.44Mo	880°C淬火, 650°C回火	460
30CrMnSiA	0.30	0.95	0.90		0.90		900°C淬火, 500°C回火	361~389
60Si2Mn	0.65	1.77	0.90			0.019V	870°C淬火, 480°C回火	274~292
63SiMn	0.63	0.25	0.65				850°C淬火, 540°C回火	199~241
45	0.45		0.5~0.8				840°C淬火, 360°C回火	203~209
35	0.35	0.28	0.71				冷轧状态	215~265
3Cr2W8V	0.31				2.1	8.5W 0.28V	1100°C淬火, 500°C回火	75~99
W6MoSCr4V2	0.82	0.25	0.25		4.0	5.0Mo 1.9V	1160°C淬火, 580°C回火	59
Cr12 MoV	1.58	≤0.4	≤0.35		12.0	0.4~0.6Mo 0.25V	1050°C淬火, 480°C回火	67
球铁		2.39	0.91			0.045Mg 0.032Re	880°C淬火, 280°C回火	130~138

二、金属材料的组织结构与性能的关系

金属材料在工程上所表现出来的机械性能，是由金属内部的组织和结构所决定的。

我们平时所看到的金属材料，表面上似乎没有什么区别，但如果采用金相分析方法，在金相显微镜下就可以发现，各种金属的内部组织是有很大差别的。用这种方法所观察到的组织称为金属材料的显微组织，显微组织是决定金属材料机械性能的重要内在因素。

铸铁是工业生产中常见的一种金属材料，在显微镜下可以看到不同种类的铸铁具有

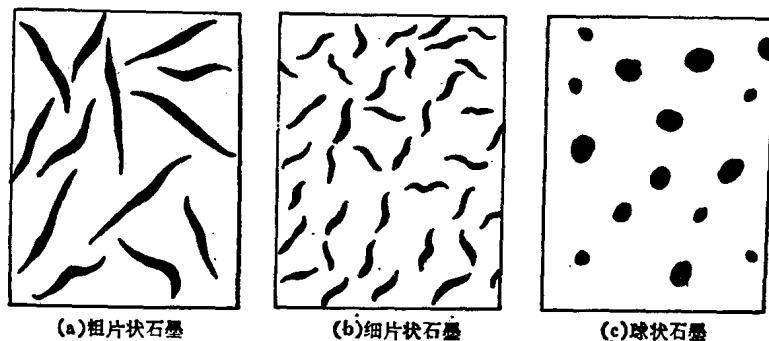


图1—7 灰铸铁和球墨铸铁中石墨分布示意图

不同形式的石墨，图 1—7 是灰铸铁和球墨铸铁中石墨分布情况的显微组织示意图。

我们可以做一个近似的实验：拿三张同样质量的纸，分别剪出上述各图所示的形状（因为石墨在铸铁中也相当于孔洞）。再将纸上方固定，下面挂以砝码，结果就会看到：粗片的容易被拉断，球状的不易被拉断，而细片的居中。这个近似的实验说明：金属材料性能与其组织形状有着十分密切的联系。当然这只是直观的比喻，但是在工程实际中，却是利用这样的基本原理来提高铸铁强度的。球墨铸铁、孕育铸铁就是在一般灰铸铁的基础上发展起来的高强度铸铁，机械性能见表 1—2 所示。

不同铸铁的机械性能

表 1—2

铸铁类别	$\sigma_b(\text{kg/mm}^2)$	$\delta(\%)$	HB	石墨形状
普通灰铸铁	12~20	0.5	117~148	粗片状
孕育铸铁	30~40	1~6	197~269	细片状
球墨铸铁	40~50	5~15	190~270	球状

碳钢是当前工业生产中应用很广泛的金属材料。不同成分的碳钢，其性能是不一样的，使用的场合也是不一样的，这是由于它们的组织不同。下边我们讨论工业纯铁（可视为含碳量极低的低碳钢）、45 钢（含碳量为 0.45% 的中碳钢）和 T8 钢（含碳量为 0.8% 的高碳钢）三种材料组织和性能的关系。

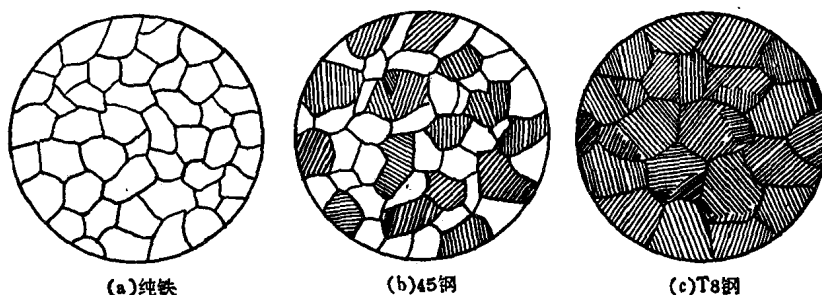


图 1—8 纯铁、45 钢、T8 钢显微组织示意图

图 1—8a 是纯铁的显微组织，由一颗颗白亮的晶粒组成，并有明显的交界，晶粒间的交界称为“晶界”。通常称这种组织为铁素体组织。图 1—8b 是 45 钢正火状态的显微组织，白亮区面积约占 45% 左右，这种白亮块呈颗粒状，并由晶界与其他组织隔开，这些白亮块就是铁素体。其余部分在显微镜下呈暗黑色，仔细观察还可以发现，它是由一些片状组织构成的，这种组织叫珠光体。因此，45 钢正火状态的显微组织是由 45% 铁素体 + 55% 珠光体所组成。图 1—8c 是 T8 钢的显微组织，在显微镜放大倍率较低时，只能看到一块块暗黑色的组织，放大倍率提高后，可以看到片层组织，这就是珠光体。

表 1—3 表示正火状态下这三种钢组织与性能的关系。

碳钢正火时的组织与性能的关系

表1—3

性 能 材 料	σ_b (kg/mm ²)	δ (%)	显 微 组 织
工业纯铁	25	50	铁素体100%
45钢	61	16	铁素体45% + 珠光体55%
T8钢	90	6	珠光体100%

由表中数据可以看出，工业纯铁的强度和硬度低，塑性高，这是由于铁素体的强度和硬度低、塑性高造成的。而珠光体的强度、硬度高，塑性低，所以 T8 钢强度、硬度高、塑性低。45钢的组织是由45%铁素体 + 55%珠光体所组成，故它的性能介于二者之间。由此可见，碳钢在正火状态下的机械性能主要决定于组织中铁素体和珠光体的含量。随着珠光体含量的增加，强度、硬度增高，而塑性下降，这是一个基本趋势。从上面分析我们可以看出，当钢中的含碳量变化时，钢内部的组织也发生变化，机械性能也随之变化。因此，这里可以得出一个重要的结论：改变钢中化学成分，使钢的内部组织发生变化，可以改变钢的性能。

通过合理的热处理方法来进一步提高钢的性能，是充分发挥金属材料最大潜力的重要方法之一。为什么同一种材料经不同的热处理后性能会发生很大变化呢？这是由于热处理过程中改变了材料的内部组织。下面以45钢为例，进行试验分析。

先将45钢分为三组试样，分别按表 1 — 4 所示的工艺进行热处理。然后测量热处理

45钢几种热处理方式

表1—4

组别	钢号	热 处 理 方 式
1	45钢	正火：试样加热到830~850℃，保温后空冷
2	45钢	调质（淬火 + 高温回火）：830~850℃加热，保温后淬火，620℃回火，回火后空冷
3	45钢	淬火 + 低温回火：830~850℃加热，保温后淬火，180℃回火，回火后空冷

后每组试样的机械性能，并将试验数据及结果列于表 1 — 5 中。三组试样热处理后的显微组织如图 1 — 9 所示。

45钢经正火处理得到的为铁素体加珠光体组织，这两种组织分布均匀，使45钢在正火状态下具有一定的机械性能。

45钢不同热处理后的机械性能

表1—5

钢号	热 处 理 方 式	机 械 性 能				
		σ_b (kg/mm ²)	σ_s (kg/mm ²)	δ_5 (%)	a_k (kg·m/cm ²)	HB
45钢	正火830~850℃空冷	≥62	≥36	≥17	≥6	≥207
45钢	调质840℃淬火，620℃回火	≥70	≥45	≥15	≥8	196~241
45钢	840℃淬火，180℃回火	≥130	≥115	≥6	≥1.5	495~532 (RC51~55)