



机电工程类专业创新型精品教材

# 工程材料及热处理

GONGCHENG CAILIAO JI RECHULI

主 编 郭芳芳 周 青



工程材料及热处理

主 编 郭芳芳 周青



扫描二维码  
共享立体资源

北京出版集团公司  
北京出版社

北京出版集团公司  
北京出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

工程材料及热处理 / 郭芳芳, 周青主编. -- 北京 :  
北京出版社, 2016.3 (2023 重印)  
ISBN 978-7-200-11920-6

I. ①工… II. ①郭… ②周… III. ①工程材料—高等  
学校—教材②热处理—高等学校—教材 IV. ①TB3  
②TG15

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 034164 号

## 工程材料及热处理

GONGCHENG CAILIAO JI RECHULI

---

主 编: 郭芳芳 周 青  
出 版: 北京出版集团公司  
北 京 出 版 社  
地 址: 北京北三环中路 6 号  
邮 编: 100120  
网 址: www.bph.com.cn  
总 发 行: 北京出版集团公司  
经 销: 新华书店  
印 刷: 定州市新华印刷有限公司  
版 次: 2016 年 3 月第 1 版 2023 年 1 月修订 2023 年 1 月第 2 次印刷  
开 本: 787 毫米×1092 毫米 1/16  
印 张: 18  
字 数: 326 千字  
书 号: ISBN 978-7-200-11920-6  
定 价: 48.00 元

质量监督电话: 010-82685218 010-58572162 010-58572393

# 目 录

1	<b>绪论</b>	
1	0.1	工程材料的地位
2	0.2	工程材料的分类及应用
5	0.3	本课程的目的与要求
7	<b>第一章</b>	<b>金属材料的性能</b>
7	1.1	金属材料的力学性能
21	1.2	金属材料的物理、化学性能
23	1.3	金属材料的工艺性能
25	<b>第二章</b>	<b>纯金属的晶体结构与结晶</b>
25	2.1	纯金属的晶体结构
29	2.2	纯金属的结晶
34	2.3	金属的同素异构转变
36	<b>第三章</b>	<b>合金的结晶与相图</b>
36	3.1	合金的晶体结构
39	3.2	二元合金相图
48	3.3	合金的性能与相图的关系
51	<b>第四章</b>	<b>铁碳合金</b>
51	4.1	铁碳合金的基本相和组织
54	4.2	铁碳合金相图分析
57	4.3	典型铁碳合金结晶过程分析
65	4.4	碳对铁碳合金组织和性能的影响
68	<b>第五章</b>	<b>金属材料的塑性变形与强化</b>
68	5.1	塑性变形的形式及过程
72	5.2	冷塑性变形对金属组织和性能的影响
76	5.3	冷塑性变形金属加热后组织和性能的变化
77	5.4	热塑性变形对金属组织和性能的影响
81	<b>第六章</b>	<b>钢的热处理</b>
81	6.1	概述

82	6.2	钢在加热时的组织转变
86	6.3	钢在冷却时的组织转变
93	6.4	钢的退火与正火
97	6.5	钢的淬火与回火
105	6.6	钢的表面热处理
109	6.7	热处理新技术及先进工艺简介
112	<b>第七章</b>	<b>钢铁材料性能及其用途</b>
112	7.1	钢铁生产
116	7.2	钢中常存杂质和合金元素的作用
118	7.3	钢的分类与编号
122	7.4	非合金钢
126	7.5	合金钢
141	7.6	特殊性能钢
144	7.7	铸铁
155	<b>第八章</b>	<b>非铁金属及其合金</b>
155	8.1	纯铝及其合金
161	8.2	纯铜及铜合金
166	8.3	纯钛及钛合金
167	8.4	轴承合金
172	<b>第九章</b>	<b>其他工程材料</b>
172	9.1	功能材料
184	9.2	纳米材料
193	9.3	未来材料的发展方向
195	<b>第十章</b>	<b>典型零件材料的选用</b>
195	10.1	零件的失效与强化
199	10.2	工程材料的强化与强韧化
202	10.3	典型零件的选材及工程材料的应用
206	10.4	典型零件的选材及工艺路线设计

215	<b>第十一章</b>	<b>工程材料选用</b>
215	11.1	工程材料在汽车上的应用
219	11.2	工程材料在机床上的应用
223	11.3	工程材料在仪器仪表上的应用
225	11.4	工程材料在石油化工设备上的应用
228	11.5	工程材料在航空航天器上的应用
232	<b>第十二章</b>	<b>工程材料试验</b>
232	12.1	硬度试验
236	12.2	金相试样的制作和显微镜的使用
240	12.3	铁碳合金的平衡组织观察
244	12.4	碳钢非平衡显微组织观察
249	12.5	碳钢的热处理
255	12.6	工业用钢、铸铁、有色合金、粉末冶金的金相组织观察
260	12.7	钢的中频感应加热表面淬火试验
262	<b>附录</b>	
262	附录 1	碳钢硬度与抗拉强度换算表
263	附录 2	压痕直径与布氏硬度对照表
265	<b>参考答案</b>	
279	<b>参考文献</b>	

# 第一章 金属材料的性能

## 学习指南 |

1. 认识、了解金属材料的物理、化学性能；
2. 理解金属材料的常用力学性能指标的概念及检测方法；
3. 理解金属材料的工艺性能；
4. 掌握金属材料的常用力学性能指标及其应用。

## 本章要点 |

1. 金属材料的常用力学性能指标及其应用；
2. 金属材料的工艺性能。

## 本章难点 |

1. 金属材料的常用力学性能指标的概念及检测方法；
2. 金属材料的工艺性能。

## 1.1 金属材料的力学性能

工程材料是现代科学技术的物质基础，金属材料是制造各种机床、机械设备和运输机械等的最主要的材料。金属材料之所以获得广泛的应用，是因为它具有各种优越的性能。在生产实践中，往往由于选材不当造成机械设备达不到使用要求或过早失效，因此，了解和熟悉材料的性能是合理选材、充分发挥工程材料内在性能潜力的重要保证。

金属材料的性能包括使用性能和工艺性能两个方面。使用性能是指金属材料在使用的条件下所表现出来的性能，它包括力学性能、物理性能和化学性能等。工艺性能是指金属材料在制造加工过程中反映出来的各种性能，包括铸造性能、锻造性能、切削加工性能和热处理工艺性能等。

力学性能是指材料在各种外力作用下抵抗变形或破坏的某些能力，是机械制造领域选用金属材料的主要依据，而且它与各种加工工艺有着密切的关系。力学性能范围较广，以试验温度区分，力学性能可分为高温力学性能、常温力学性能和低温力学性能。本书主要介绍常温力学性能。

力学性能包括强度、塑性、硬度、冲击韧性及疲劳强度等。

金属材料在加工及使用过程中所受的外力称为载荷。根据载荷作用性质的不同，对金属材料的力学性能要求也不同。载荷按其作用性质的不同可分为以下3种。

- (1) 静载荷：大小不变或变化过程缓慢的载荷。
- (2) 冲击载荷：在短时间内以较高速度作用于零件上的载荷。

(3) 交变载荷：大小、方向或大小和方向随时间做周期性变化的载荷。

机械零件在使用过程或加工过程中，会受到不同形式外力的作用。如柴油机的连杆在工作时不仅受到拉力和压力的作用，还要受冲击力的作用；起重机上的钢丝绳受到悬吊物体的拉力作用。根据作用形式的不同，载荷可分为拉伸载荷、压缩载荷、弯曲载荷、剪切载荷和扭转载荷等，如图 1-1 所示。

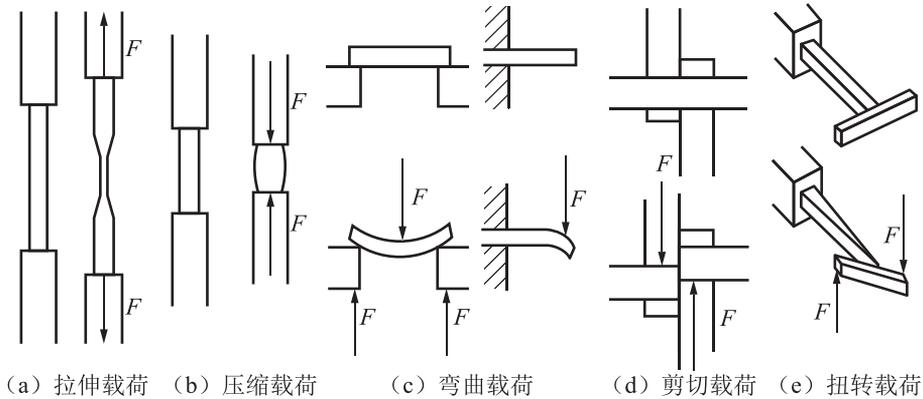


图 1-1 载荷的作用形式

金属材料受到载荷作用后，产生的几何形状和尺寸的变化称为变形。变形分为弹性变形和塑性变形两种。

材料在载荷作用下发生变形，而当载荷卸除后，变形也完全消失。这种随载荷的卸除而消失的变形称为弹性变形。

当作用在材料上的载荷超过某一限度时，若卸除载荷，大部分变形随之消失（弹性变形部分），但还是留下了不能消失的部分变形。这种不随载荷的卸除而消失的变形称为塑性变形，也称为永久变形。

当受外力作用时，为保持材料自身形状尺寸不变，在材料内部作用着与外力相对抗的力，称为内力。内力的大小与外力相等，方向则与外力相反，和外力保持平衡。单位面积上的内力称为应力。金属受拉伸载荷或压缩载荷作用时，其横截面上的应力按下式计算：

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1-1)$$

式中： $\sigma$ ——应力，MPa；

$F$ ——外力，N；

$S$ ——横截面积， $\text{mm}^2$ 。

### 1.1.1 强度指标及应用

金属材料在载荷作用下抵抗塑性变形或断裂的能力称为强度。强度的大小通常用应力来表示，强度越高，材料所能承受的载荷越大。

根据载荷作用方式的不同，强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度和抗扭强度 5 种。工程上常以屈服强度和抗拉强度作为强度指标。

抗拉强度是通过拉伸金属试验测定的，通常在拉伸试验机上进行。拉伸试验的方法是用静拉力对标准试样进行轴向拉伸，同时连续测量力和相应的伸长量，直至试样断裂，根据测得的数据，即可得出有关的力学性能。

## 1. 拉伸试样

拉伸试样的形状一般有圆形和矩形两类。在国家标准（GB/T 228.1—2010）中，对试样的形状、尺寸及加工要求均有明确的规定。如图 1-2 所示为圆形拉伸试样。

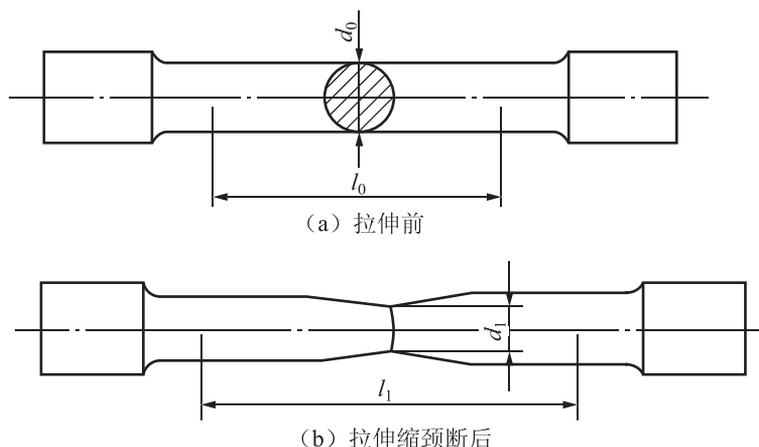


图 1-2 圆形拉伸试样

图中  $d_0$  是试样的直径， $l_0$  为标距长度。根据标距长度与直径之间的关系，试样可分为长试样 ( $l_0 = 11.3d_0$ ) 和短试样 ( $l_0 = 5.65d_0$ ) 两种。

## 2. 力和拉伸曲线

拉伸试验过程中随着载荷的均匀增加，试样不断地由弹性伸长过渡到塑性伸长直至断裂。一般试验机都有自动记录装置，可以把作用在试样上的力和伸长量描绘成拉伸图，也叫作应力—应变曲线。图 1-3 所示为低碳钢的应力—应变曲线，图中纵坐标表示应力，单位为 MPa；横坐标表示应变。图中明显地表现出下面几个变形阶段：

### (1) 弹性变形阶段

$Oa$ ——弹性变形阶段。当给材料施加载荷后，试样产生伸长变形。试样的变形完全是弹性的，如果载荷卸载，试样可恢复原状。在  $a$  点以下，载荷和变形量成线性关系。

$ab$ ——滞弹性阶段。在此阶段，应力—应变曲线出现了非直线关系，其特点是：当力加到  $b$  点时然后卸载，应变仍可回到原点，但不是沿原曲线轨迹回到原点，在不同程度上滞后于应力回到原点，形成一个闭合环，加力和卸力所表现的特性仍为弹性行为，只不过有不同程度的滞后，因此称为滞弹性阶段。这个阶段的过程很短，也称为理论弹性阶段。当施加力超过比例伸长力  $F_a$  后，力和变形不成线性关系，直至最大弹性伸长力  $F_b$ 。 $F_b$  为试样能恢复到原始形状和尺寸的最大拉伸力，一般来说  $F_a$  与  $F_b$  非常接近。

## (2) 塑性变形阶段

*bc*——微塑性应变阶段。这个阶段是材料在加载过程中屈服前的微塑性变形部分，塑性变形量很小，是不可回复的。

*cde*——屈服阶段。这个阶段是金属材料的不连续屈服的阶段，也称间断屈服阶段，其现象是当力加至 *c* 点时，突然产生塑性变形，由于试样变形速度非常快，以致试验机夹头的拉伸速度跟不上试样的变形速度，试验力不能完全有效地施加于试样上，在曲线上的这个阶段力表现出不同程度的下降，而试样塑性变形急剧增加，直至达到 *e* 点结束。当达到 *c* 点，在试样的外表面能观察到与试样轴线呈  $45^\circ$  的明显的滑移线。当载荷增加到  $F_c$  时，应力—应变曲线上出现平台或锯齿状，这种在载荷不增加或略有减小的情况下，试样还继续伸长的现象叫作屈服。屈服后，材料开始出现明显的塑性变形，材料完全丧失了抵抗变形的能力。在试样表面开始出现与轴线成约  $45^\circ$  的滑移线。

*c* 点是拉伸试验的一个重要的性能判据点，*de* 范围内的最低点也是重要的性能判据点，分别称为上屈服点和下屈服点。*e* 点是屈服的结束点，所对应的应变是判定板材成型性能的重要指标。

*ef*——塑性应变硬化阶段。屈服阶段结束后，试样在塑性变形下产生应变硬化，在 *e* 点应力不断上升，在这个阶段内试样的变形是均匀和连续的，应变硬化效应是由位错密度增加而引起的，此时必须不断继续施加力，才能使位错继续滑移运动，直至 *f* 点。*f* 点通常是应力—应变曲线的最高点，此点所对应的应力是重要的性能判据。

## (3) 缩颈阶段

*fg*——缩颈变形阶段。当载荷达到最大值  $F_f$  后，试样的直径发生局部收缩，称为“缩颈”。随着试样缩颈处横截面积的减小，试样变形所需的载荷也随之降低，而变形继续增加，这时伸长主要集中于缩颈部位。当到达 *g* 点时试样发生断裂。

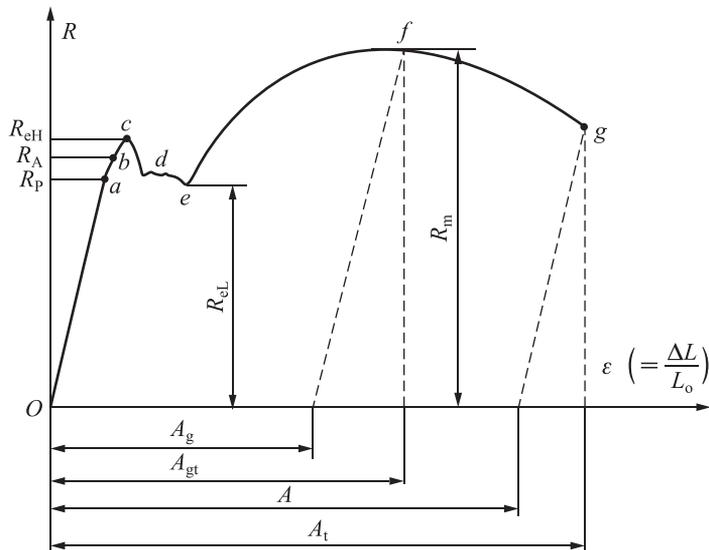


图 1-3 低碳钢的应力—应变曲线

从以上典型的应力—应变曲线上，可以得出定金属材料的以下性能指标：

上屈服强度  $R_{eH}$ ：(c 点) 试样发生屈服而力首次下降前的最高应力。

下屈服强度  $R_{eL}$ ：(e 点) 不计初始瞬间效应时屈服期间的最低应力。

抗拉强度  $R_m$ ：(f 点) 在最大力点所对应的应力。

屈服点延伸率  $A_e$ ：(ce) 对于呈现明显屈服现象的材料，从屈服开始至均匀硬化开始之间的延伸率。

最大力总延伸率  $A_{gt}$ ：从 f 点向横坐标轴作垂线，垂足与原点的长度对应的伸长率。

最大力塑性延伸率  $A_g$ ：在 f 点处作一平行于  $Oa$  (弹性阶段) 的直线，它与横坐标轴的交点到原点的长度对应的伸长率。

断裂总延伸率  $A_t$ ：g 点断裂时刻的试样总伸长率 (包括弹性伸长率和塑性伸长率)。

伸长率  $A$ ：在 g 点处作一平行于  $Oa$  的直线，它与横坐标轴的交点到原点的长度对应的伸长率。

工程上使用的金属材料，有的没有明显的屈服现象，如退火的轻金属、退火及调质的合金钢等。有些脆性材料，不仅没有屈服现象，而且也不产生“缩颈”，如铸铁等。图 1-4 为铸铁的拉力—伸长曲线。

### 3. 应力—应变

若用试样的原始横截面积  $S_0$  除拉力  $F$ ，则得到试样所受的应力  $R$ ，即

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (1-2)$$

用试样相应的变形量除以试样的原始标距即得其相对变形 (即应变)，即

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1-3)$$

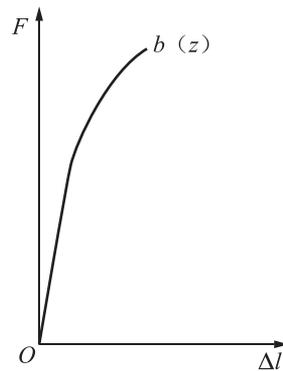


图 1-4 铸铁的拉力—伸长曲线

### 4. 强度指标及其意义

在拉伸的各个阶段，分别对应有典型的应力。常用的强度指标有屈服强度和抗拉强度，应重点掌握。

#### (1) 屈服强度

屈服强度包括上屈服强度和下屈服强度。计算公式为

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0}, R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} \quad (1-4)$$

式中： $R_{eH}$ ， $R_{eL}$ ——上、下屈服强度，MPa；

$F_{eH}$ ， $F_{eL}$ ——试样上、下屈服时对应的载荷，N；

$S_0$ ——试样原始横截面积， $\text{mm}^2$ 。

工业上使用的许多金属材料，在拉伸试验过程中，没有明显的屈服现象。对于无明显屈服现象的金属材料，按国家标准规定，可用规定残余伸长应力  $R_{P0.2}$  表示屈服点。

$R_{p0.2}$ 表示试样卸除载荷后，其标距部分的残余伸长率达到0.2%时的应力，也称为条件屈服强度。计算公式为

$$R_{p0.2} = \frac{F_P}{S_0} \quad (1-5)$$

式中： $R_{p0.2}$ ——规定残余伸长应力，MPa；

$F_P$ ——残余伸长率达0.2%时的载荷，N；

$S_0$ ——试样原始横截面积， $\text{mm}^2$ 。

屈服强度和规定残余伸长应力都是衡量金属材料塑性变形抗力的指标。机械零件在工作时如受力过大，则因过量的塑性变形而失效。当零件工作时所受的应力低于材料的屈服强度或规定的残余伸长应力，则不会产生过量的塑性变形。材料的屈服强度或规定的残余伸长应力越高，允许的工作应力也越高，则零件的截面尺寸及自身质量就可以减小。因此，材料的屈服强度或规定的残余伸长应力是机械零件设计的主要依据，也是评定金属材料性能的重要指标。

屈服强度是对组织、成分敏感的材料性能，可以通过热处理、合金化以及塑性变形等方法使其在很大范围内发生变化。提高材料的屈服强度往往是热处理、合金化以及塑性变形的目的之一。

## (2) 抗拉强度 $R_m$

材料在拉断前所能承受的最大载荷与原始截面积之比称为抗拉强度，用符号  $R_m$  表示。计算公式为

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (1-6)$$

式中： $R_m$ ——抗拉强度，MPa；

$F_m$ ——试样拉断前承受的最大载荷，N；

$S_0$ ——试样原始横截面积， $\text{mm}^2$ 。

对塑性材料来说，在  $F_m$  以前试样均匀变形，而在  $F_m$  以后变形将集中在颈部。强度极限表征材料对最大均匀塑性变形的抗力，它在技术上非常重要。工程上把抗拉强度作为设计时的主要依据之一，也是材料的主要力学性能指标之一。零件在工作中所承受的应力，不允许超过抗拉强度，否则就会断裂。 $R_m$  也是机械零件设计和选材的重要依据。

### 1.1.2 塑性指标及应用

金属材料在载荷作用下产生塑性变形而不断裂的能力称为塑性。塑性指标也是由拉伸试验测得的，常用伸长率和断面收缩率来表示。

#### 1. 伸长率

试样拉断后，标距的伸长量与原始标距的百分比称为伸长率，用符号  $A$  表示。其计算公式为

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中：A——伸长率，%；

$L_u$ ——试样拉断后的标距，mm；

$L_0$ ——试样的原始标距，mm。

必须说明，同一材料的试样长短不同，测得的伸长率也是不同的。长、短试样的伸长率分别用符号 A 和  $A_{11.3}$  表示。

## 2. 断面收缩率

试样拉断后，缩颈处横截面积的缩减量与原始横截面积的百分比称为断面收缩率，用符号 Z 表示。其计算公式为

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中：Z——断面收缩率，%；

$S_0$ ——试样原始横截面积， $\text{mm}^2$ ；

$S_u$ ——试样拉断后缩颈处的横截面积， $\text{mm}^2$ 。

金属材料的伸长率 (A) 和断面收缩率 (Z) 数值越大，表示材料的塑性越好。塑性好的金属可以发生大量塑性变形而不被破坏，也易于加工成复杂形状的零件。例如，工业纯铁的 A 可达 50%，Z 可达 80%，可以拉制细丝、轧制薄板等。铸铁的 A 几乎为零，所以不能进行塑性变形加工。塑性好的材料，在受力过大时，首先产生塑性变形而不致发生突然断裂，因此比较安全。

特别说明：在 GB/T 228.1—2010 中，用“R”取代“ $\sigma$ ”表示应力和强度符号；用“A”取代“ $\delta$ ”表示伸长率符号；用“Z”取代“ $\psi$ ”表示断面收缩率；用“ $L_u$ ”取代“ $L_1$ ”，用“ $d_u$ ”取代“ $d_1$ ”。

### 1.1.3 硬度指标及应用

材料抵抗局部变形，特别是塑性变形、压痕或划痕的能力称为硬度。它不是一个单纯的物理或力学量，而是代表弹性、塑性、塑性变形强化率、强度和韧性等一系列不同物理量的综合性能指标。

硬度是各种零件和工具必须具备的性能指标。机械制造业所用的刀具、量具、模具等都应具备足够的硬度，才能保证使用性能和寿命。有些机械零件如齿轮等，也要求有一定的硬度，以保证足够的耐磨性和使用寿命。因此，硬度是金属材料重要的力学性能指标之一。

硬度值又可以间接地反映金属的强度及金属在化学成分、金相组织和热处理工艺上的差异，而与拉伸试验相比，硬度试验简便易行，因而硬度试验应用十分广泛。硬度测试的方法很多，最常用的有布氏硬度试验法、洛氏硬度试验法两种。

#### 1. 布氏硬度

(1) 测试原理。使用直径为  $D$  的球体 (钢球或硬质合金球)，以规定的试验力  $F$  压入试样表面，经规定保持时间后卸除试验力，然后测量表面压痕直径  $d$ ，用压痕表面积  $S$  除载荷  $F$  所得的商即为布氏硬度，如图 1-5 所示。

布氏硬度值是用球面压痕单位表面积上所承受的平均压力来表示的，用符号 HBS

(HBW) 来表示。布氏硬度值按下式计算

$$\text{HBS (HBW)} = \frac{F}{S} = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-9)$$

式中：HBS (HBW) ——用钢球 (或硬质合金球) 试

验时布氏硬度值；

$F$ ——试验力，N；

$S$ ——球面压痕表面积， $\text{mm}^2$ ；

$D$ ——球体直径，mm；

$d$ ——压痕平均直径，mm。

从上式中可以看出，当试验力 ( $F$ )、压头球体直径 ( $D$ ) 一定时，布氏硬度值仅与压痕直径 ( $d$ ) 的大小有关。 $d$  越小，布氏硬度值越大，也就是硬度越高；相反， $d$  越大，布氏硬度值越低。

通常，布氏硬度值不标出单位。在实际应用中，布氏硬度一般不用计算，而是用专用的刻度放大镜量出压痕直径 ( $d$ )，根据压痕直径的大小，再从专门的硬度表中查出相应的布氏硬度值。

(2) 布氏硬度的表示方法。布氏硬度的表示符号有 HBS 和 HBW 两种。压头为淬火钢球时用 HBS 表示，一般适用于测量软灰铸铁、有色金属等布氏硬度值在 450 以下的材料。压头为硬质合金球时，用 HBW 表示，适用于布氏硬度值在 650 以下的材料。符号 HBS 或 HBW 之前的数字为硬度值，符号后面按以下顺序用数字表示试验条件：

- ① 球体直径。
- ② 试验力。
- ③ 试验力保持的时间 (10~15 s，不标注)。

例如：270 HBS 10/1 000/25 表示用直径 10 mm 的钢球，在 9 806 N (1 000 kgf) 试验力的作用下，保持 25 s 时测得的布氏硬度值为 270；490 HBW 5/750 表示用直径 5 mm 的硬质合金球，在 7 355 N (750 kgf) 试验力的作用下，保持 10~15 s 时测得的布氏硬度值为 490。

做布氏硬度试验时，压头球体的直径 ( $D$ )、试验力 ( $F$ ) 及试验力保持的时间 ( $t$ )，应根据被测金属材料的种类、硬度值的范围及金属的厚度进行选择。常用的压头球体直径 ( $D$ ) 有 1 mm、2 mm、2.5 mm、5 mm 和 10 mm 5 种，试验力 ( $F$ ) 在 9.807 N~29.42 kN 范围内，二者之间的关系如表 1-1 所示。

表 1-1 根据材料和布氏硬度范围选择试验条件

材料	布氏硬度	$0.102F/D^2$	加载保持时间/s
钢及铸铁	<140	10	10
	$\geq 140$	30	
铜及其合金	<35	5	60
	35~130	10	30
	>130	30	30

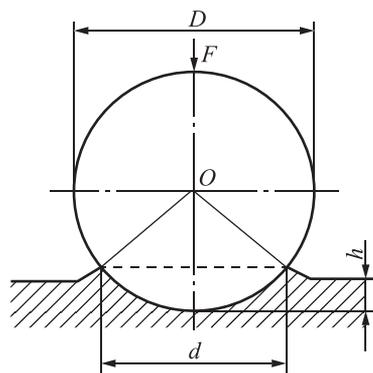


图 1-5 布氏硬度试验原理图

续表

材料	布氏硬度	$0.102F/D^2$	加载保持时间/s
轻金属及其合金	<35	2.5 (1.25)	60
	35~80	10 (5 或 15)	30
	>80	10 (15)	30
铅、锡		1.25 (1)	

注：① 当试验条件允许时，应尽量选用直径为 10 mm 的球；

② 当有关标准中没有明确规定时，应使用无括号的  $F/D^2$  值。

(3) 特点及应用范围。布氏硬度是使用最早、应用最广的硬度试验方法，主要用于测定灰铸铁、有色金属、各种软钢等硬度不是很高的材料。

测量布氏硬度采用的试验力大，球体直径也大，因而压痕直径也大，因此能较准确地反映出金属材料的平均性能。另外，由于布氏硬度与其他力学性能（如抗拉强度）之间存在着一定的近似关系，因而在工程上得到了广泛的应用。

测量布氏硬度的缺点是操作时间较长，对不同材料需要不同的压头和试验力，压痕测量较费时。在进行高硬度材料试验时，由于球体本身的变形会使测量结果不准确，因此用钢球压头测量时，材料硬度值必须小于 450；用硬质合金球压头测量时，材料硬度值必须小于 650。布氏硬度试验法又因其压痕较大，故不宜用于测量成品及薄件。

## 2. 洛氏硬度

(1) 洛氏硬度测试原理。洛氏硬度试验采用金刚石圆锥体或淬火钢球压头，压入金属表面后，经规定保持时间后卸除主试验力，以测量的压痕深度来计算洛氏硬度值。测量的示意图如图 1-6 所示。

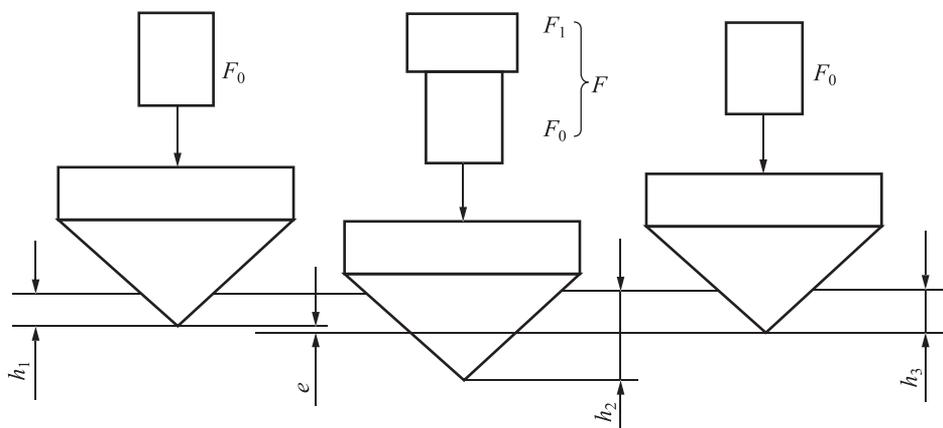


图 1-6 洛氏硬度测试过程示意图

测量时，先加初试验力  $F_0$ ，压入深度为  $h_1$ ，目的是消除因被测零件表面不光滑而造成的误差；然后再加主试验力  $F_1$ ，在总试验力  $(F_0 + F_1)$  的作用下，压头压入深度

为  $h_2$ 。卸除主试验力，弹性变形的恢复，使压头回升到  $h_3$  的位置，则由试验力所引起的塑性变形的压痕深度  $e = h_3 - h_1$ 。显然， $e$  值越大，被测金属的硬度越低。为了符合数值越大，硬度越高的习惯，将 0.002 mm 的压痕深度作为一个硬度单位，用一个常数减去  $e/0.002$  来表示硬度的大小，由此获得洛氏硬度值，用符号 HR 表示，即洛氏硬度值按下列公式计算

$$\text{HR} = K - \frac{e}{0.002} \quad (1-10)$$

式中：HR——洛氏硬度值；

$K$ ——常数，用金刚石圆锥体压头进行试验时  $K$  为 100，用钢球压头进行试验时  $K$  为 130；

$e$ ——压痕深度，mm。

洛氏硬度没有单位，试验时硬度值直接从硬度计的表盘上读出。

(2) 常用洛氏硬度标尺及其适用范围。为了用一台硬度计测定从软到硬不同金属材料的硬度，可采用不同的压头和总试验力组成几种不同的洛氏硬度标尺，每一种标尺用一个字母在洛氏硬度符号 HR 后面加以注明。常用的洛氏硬度标尺是 A、B、C 3 种，其中 C 标尺应用最为广泛。3 种洛氏硬度标尺的试验条件和适用范围如表 1-2 所示。

表 1-2 3 种洛氏硬度标尺的试验条件和应用举例

标尺	硬度符号	压头型号	初载+主载= 总载荷/N	常用范围	应用举例
A	HRA	金刚石圆锥	98.07+490.3=588.4 (10+50=60)	70~85	碳化物、硬质合金、 表面淬火钢
B	HRB	钢球 $\phi$ 1.588 mm	98.07+882.6=980.67 (10+90=100)	25~100	软钢、退火钢、铜合 金等
C	HRC	金刚石圆锥	98.07+1 373=1 471.07 (10+140=150)	20~67	淬火钢、调质钢

如图 1-7 所示为 HR-150 型洛氏硬度计结构示意图。硬度计由载荷机构、加卸载控制机构、测量指示机构、试样支承机构和机架等部分组成。

各种不同标尺的洛氏硬度值不能直接进行比较，但可用试验测定的换算表相互比较。

洛氏硬度表示方法如下：符号 HR 前面的数字表示硬度值，HR 后面的字母表示不同洛氏硬度的标尺。例如，45 HRC 表示用 C 标尺测定的洛氏硬度值为 45。

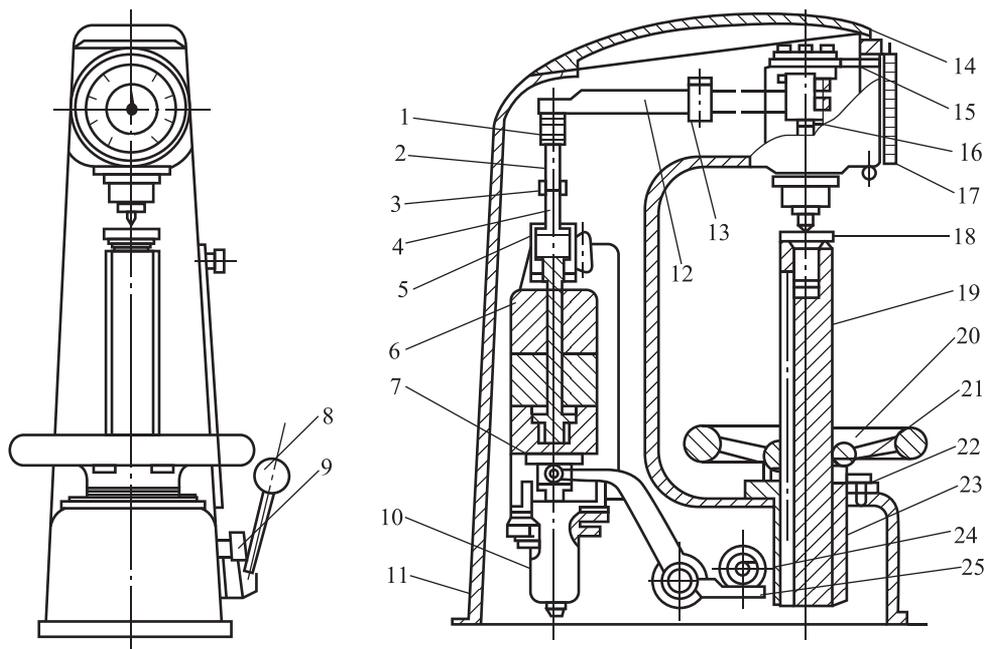


图 1-7 HR-150 型洛氏硬度计结构示意图

- 1—吊环；2—连接杆；3—螺母；4—吊杆；5—吊套；6—砝码；7—托盘；8—加卸载荷手柄；  
 9—缓冲器调节阀；10—缓冲器；11—机体；12—试验力杠杆；13—游码；14—上盖；15—测量杆；  
 16—主轴；17—指示百分表；18—工作台；19—升降丝杆；20—手轮；21—止推轴承；22—螺钉；  
 23—丝杆导座；24—定位套；25—连杆

(3) 特点。洛氏硬度试验的优点是操作简单迅速，十分方便，能直接从刻度盘上读出硬度值；压痕较小，几乎不伤及工件表面，故可用来测定成品及较薄的工件；测试的硬度值范围大，可测从很软到很硬的金属材料。其缺点是：压痕较小，当材料的内部组织不均匀时，硬度数据波动较大，测量值的代表性差，通常需要在不同部位测试数次，取其平均值来代表金属材料的硬度。

#### 1.1.4 冲击韧性

金属材料的强度、塑性和硬度等力学性能是在静载荷作用下测得的，而许多机械零件在工作中往往要受到冲击载荷的作用，如活塞销、锤杆、冲模和锻模等。制造这类零件所用的材料，其性能指标不能单纯用静载荷作用下的指标来衡量，而必须考虑材料抵抗冲击载荷的能力。金属材料抵抗冲击载荷作用而不被破坏的能力称为冲击韧性。目前，常用一次摆锤冲击弯曲试验来测定金属材料的冲击韧性。

##### 1. 冲击试样

冲击试验是一种动态力学试验。为了使试验结果可以互相比较，必须采用标准试样。冲击试样的类型很多，可根据国家标准有关规定来选择。常用的试样有  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 55\text{ mm}$  的 U 形缺口试样和 V 形缺口试样，其尺寸如图 1-8 和图 1-9 所示。

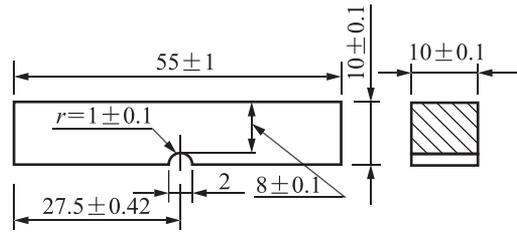


图 1-8 U形缺口冲击试样

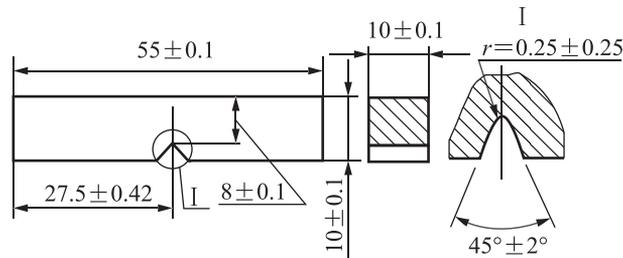


图 1-9 V形缺口冲击试样

## 2. 冲击试验的原理及方法

冲击试验是利用能量守恒原理：试样被冲断过程中吸收的能量等于摆锤冲击试样前后的势能差。

冲击试验：将待测的金属材料加工成标准试样，然后将试样放在冲击试验机的支座上，放置时使试样缺口背向摆锤的冲击方向，如图 1-10 (a) 所示，再将具有一定重量  $G$  的摆锤升至一定的高度  $H_1$ ，如图 1-10 (b) 所示，使其获得一定的势能 ( $GH_1$ )，然后使摆锤自由落下，将试样冲断。摆锤的剩余势能为  $GH_2$ 。试样被冲断时所吸收的能量即摆锤冲击试样所做的功，称为吸能量，用符号  $K$  表示。其计算公式为

$$K = GH_1 - GH_2 = G(H_1 - H_2) \quad (1-11)$$

式中： $K$ ——吸收能量，J；

$G$ ——摆锤的重力，N；

$H_1$ ——摆锤初始的高度，m；

$H_2$ ——冲断试样后摆锤回升的高度，m。

吸收能量 ( $K$ ) 除以试样缺口处横截面积 ( $S_0$ )，即可得到材料的冲击韧度，用符号  $\alpha_K$  表示。其计算公式为

$$\alpha_K = \frac{K}{S_0} \quad (1-12)$$

式中： $\alpha_K$ ——冲击韧度，J/cm<sup>2</sup>；

$K$ ——吸收能量，J；

$S_0$ ——试样缺口处横截面积，cm<sup>2</sup>。

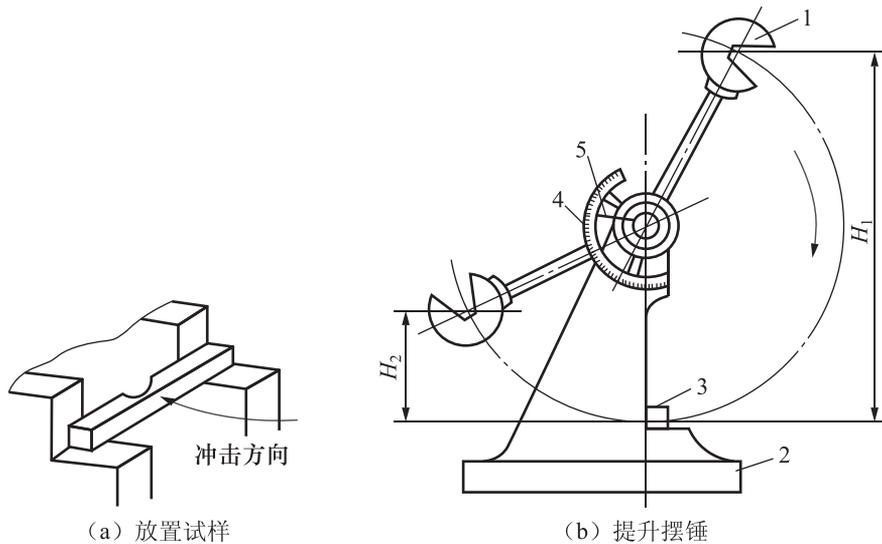


图 1-10 冲击试验示意图

1—摆锤；2—机架；3—试样；4—刻度盘；5—指针

冲击韧度是冲击试样缺口处单位横截面积上的冲击吸收功。冲击韧度越大，表示材料的冲击韧性越好。

必须说明的是，使用不同类型的试样（V形缺口或U形缺口）进行试验时，其吸收能量应分别标为KV或KU，冲击韧度则标为 $\alpha_{KV}$ 或 $\alpha_{KU}$ 。

摆锤冲击弯曲试验已有多年历史，尽管 $\alpha_K$ 值作为一个力学性能指标用来评定材料的冲击韧性仍有许多不足之处，但由于它在生产中长期使用，积累了大量有价值的资料和数据。实践证明，冲击韧性对金属材料在不同条件下的脆性转化和组织缺陷非常敏感，它能灵敏地反映材料的品质，因而冲击试验是生产上用来检验冶炼、热加工、热处理工艺质量的有效方法之一。

### 3. 小能量多次冲击试验

在工程实际中，在冲击载荷作用下的机械零件很少因一次大能量冲击而遭破坏，绝大多数是经一次冲击不足以使零件破坏的小能量多次重复冲击最后导致断裂的。如凿岩机风镐上的活塞、冲模的冲头等，它们的破坏是由于多次冲击损伤的积累，导致裂纹的产生与扩展的结果，根本不同于一次冲击的破坏过程。对于这样的零件，用冲击韧度来作为设计依据显然是不符合实际的。因此，不能用一次冲击试验所测得的 $\alpha_K$ 值来衡量这些零件材料对冲击载荷的抗力。

实践表明，一次冲击韧度高的材料，在小能量多次冲击试验条件下，抗力不一定高，反过来也一样。如大功率柴油机曲轴是用孕育铸铁制成的，它的冲击韧度接近于零，而在长期使用中未发生断裂。因此，需要采用小能量多次冲击试验来检验这类金属的抗冲击性能。

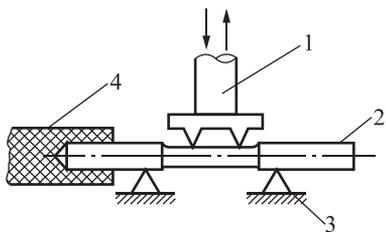


图 1-11 小能量多次冲击工作图

1—冲锤；2—试样；3—支承座；

4—橡胶传动轴

小能量多次冲击试验机为凸轮落锤式结构，它由一个刚性较好的机架、冲锤、带轮、试样旋转机构和计数装置等组成，如图 1-11 所示。冲击能量靠调节冲锤的冲程来实现。冲锤对试样每冲击一次，试样可通过橡胶传动轴旋转一定角度，一直到试样开裂或冲断为止。试样在冲锤多次冲击下损坏时，经受的冲击次数 ( $N$ ) 代表金属的抗冲击能力。

大量试验证明，金属材料受大能量的冲击载荷作用时，其冲击抗力主要取决于冲击韧度  $\alpha_K$  的大小，而在小能量多次冲击条件下，其冲击抗力主要取决于材料的强度和塑性。当冲击能量高时，材料的塑性起主导作用；当冲击能量低时，强度起主导作用。

### 1.1.5 疲劳强度

许多机械零件，如轴、齿轮、轴承、叶片、弹簧等，在工作过程中各点的应力随时间做周期性的变化。这种随时间做周期性变化的应力称为交变应力（也称为循环应力）。在交变应力的作用下，虽然零件所承受的应力低于材料的屈服点，但经过较长时间的工作后产生裂纹或突然发生完全断裂的现象称为金属的疲劳。

疲劳破坏是机械零件失效的主要原因之一。据统计，在机械零件失效中大约有 80% 属于疲劳破坏，而且疲劳破坏前没有明显的变形，所以，疲劳破坏经常造成重大事故。

#### 1. 疲劳破坏的特征

尽管交变载荷有各种不同的类型，但疲劳破坏仍有以下共同的特点：

- (1) 疲劳断裂时并没有明显的宏观塑性变形，断裂前没有征兆，而是突然破坏。
- (2) 引起疲劳断裂的应力很低，一般情况下低于材料的屈服点。
- (3) 疲劳破坏的宏观断口由两部分组成，即疲劳裂纹的产生及扩展区和最后断裂区。

机械零件产生疲劳断裂的原因是材料表面或内部有缺陷（夹杂、划痕、显微裂纹等），这些部位在交变应力反复作用下产生了微裂纹，致使其局部应力大于屈服点，从而产生局部塑性变形，导致开裂。随着应力循环次数的增加，裂纹不断扩展使零件实际承受载荷的面积不断减少，直至减少到不能承受外加载荷的作用时而产生突然断裂。

#### 2. 疲劳强度和疲劳曲线

材料的疲劳极限通常都是在旋转弯曲疲劳试验机上测定的。在交变载荷的作用下，材料承受的交变应力值  $\sigma$  与断裂前的应力循环次数  $N$  之间的关系称为疲劳曲线，如图 1-12 所示。该曲线表明，金属承受的交变应力越小，断裂前的应力循环次数  $N$  越多；反之，则  $N$  越少。从图 1-12 中可以看出，当应力达到  $\sigma_s$  时，曲线与横坐标轴平

行，表示应力低于此值时，试样可以经受无数的周期循环而不被破坏，此应力值称为材料的疲劳极限。

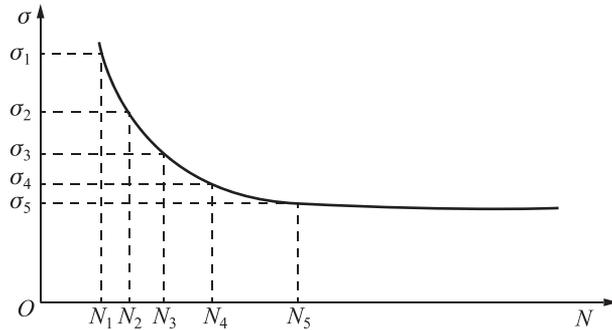


图 1-12 疲劳曲线示意图

工程上规定，材料在无限多次交变应力作用下而不被破坏的最大应力称为疲劳极限。显然疲劳极限的数值越大，材料抵抗疲劳破坏的能力越强。当应力为对称循环时，如图 1-13 所示，疲劳极限用符号  $\sigma_{-1}$  表示。

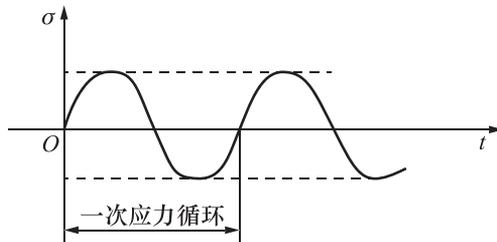


图 1-13 对称循环应力图

实际上，测定时金属材料不可能做无数次交变载荷试验。所以一般试验时规定，对于黑色金属应力循环取  $10^7$  周次，有色金属、不锈钢等取  $10^8$  周次交变载荷时，材料不断裂的最大应力称为该材料的疲劳极限。

金属的疲劳极限受到很多因素的影响，如内部质量、工作条件、表面状态、材料成分、组织及残余内应力等。避免断面形状的急剧变化、改善零件的结构形式、降低零件表面粗糙度及采取各种表面强化的方法，都能提高零件的疲劳极限。

## 1.2 金属材料的物理、化学性能

### 1.2.1 物理性能

工程材料的物理性能包括密度、熔点、导电性、导热性、热膨胀性和磁性等。各种机械零件由于用途不同，对材料的物理性能要求也有所不同。

(1) 密度。表示某种金属单位体积的质量。密度是金属材料的特性之一，工程上

通常用密度来计算零件毛坯的质量。密度直接关系到由它所制成的零件或构件的质量或紧凑程度，这点对于要求减轻机械自重的航空和宇航工业制件具有特别重要的意义。

(2) 熔点。金属材料由固态转变为液态时的熔化温度。金属都有固定的熔点，合金的熔点取决于成分，例如，钢是铁和碳组成的合金，含碳量不同，熔点也不同。根据熔点的不同，金属材料可分为低熔点金属和高熔点金属两大类。熔点高的金属称为难熔金属（如 W、Mo、V 等），可用来制造耐高温零件，例如，喷气发动机的燃烧室需用高熔点合金来制造。

(3) 导热性。金属材料传导热量的能力。衡量金属材料导热性能好坏的主要性能指标是热导率，热导率大的材料，导热性就好。合金的导热性比纯金属差，例如，合金钢的导热性较差，当其进行锻造或热处理时，加热速度应慢一些，否则会形成较大的内应力而产生裂纹。

(4) 导电性。金属材料传导电流的能力。电导率是表示材料导电能力的性能指标。在金属中，以银的导电性为最好，其次是铜和铝，合金的导电性比纯金属差。导电性好的金属适于制作导电材料（纯铝、纯铜等）；导电性差的材料适于制作电热元件。

(5) 热膨胀性。金属材料随温度变化体积发生膨胀或收缩的特性。一般材料都具有热胀冷缩的特点。在工程实际中，许多场合要考虑热膨胀性。例如，制造内燃机活塞的材料，热膨胀系数要小；铺设铁轨时，两根钢轨衔接处应留有一定空隙，使钢轨在长度方向有伸缩的余地；制订热加工工艺时，应考虑材料的热膨胀影响，尽量减小工件的变形和开裂等。

## 1.2.2 化学性能

(1) 耐腐蚀性。金属材料在常温下抵抗氧、水蒸气等化学介质腐蚀破坏作用的能力。腐蚀对金属的危害很大，每年因腐蚀而损耗掉大量的金属材料，这种现象在制药、化肥、制酸、制碱等部门更为严重。因此，提高金属材料的耐腐蚀性，对于节约金属、延长零件使用寿命具有积极的现实意义。

(2) 抗氧化性。金属材料在高温下抵抗氧化作用的能力。钢铁材料在高温下（570℃以上）表面易氧化，主要原因是生成了疏松多孔的 FeO，氧原子易通过 FeO 进行扩散，使钢内部不断氧化，温度越高，氧化速度越快。氧化使得在铸、锻、焊等热加工时，钢铁材料损耗严重，也容易出现加工缺陷。通过合金化在材料表面形成保护膜，或在工件周围营造一种保护气氛，均能提高材料的抗氧化性。

(3) 化学稳定性。金属材料的耐腐蚀性和抗氧化性的总称。在高温下工作的热能设备（锅炉、汽轮机、喷气发动机等）上的零件应选择热稳定性好的材料制造；在海水、酸、碱等腐蚀环境中工作的零件，必须采用化学稳定性良好的材料。例如，化工设备通常采用不锈钢来制造。

## 1.3 金属材料的工艺性能

### 1.3.1 铸造性能

金属及合金在铸造工艺中获得优良铸件的能力称为铸造性能。衡量铸造性能的主要指标有流动性、收缩性和偏析倾向等。金属材料中，灰铸铁和青铜的铸造性能较好。

(1) 流动性。熔融金属的流动能力称为流动性，它主要受金属化学成分和浇铸温度等的影响。流动性好的金属容易充满铸型，从而获得外形完整、尺寸精确、轮廓清晰的铸件。

(2) 收缩性。铸件在凝固和冷却的过程中，其体积和尺寸减小的现象称为收缩性。铸件收缩不仅影响尺寸精度，还会使铸件产生缩孔、疏松、内应力、变形和开裂等缺陷，故用于铸造的金属的收缩率越小越好。

(3) 偏析倾向。金属凝固后，内部化学成分和组织的不均匀现象称为偏析倾向。偏析倾向严重时能使铸件各部分的力学性能产生很大的差异，降低了铸件的质量，对于大型铸件的危害更大。

### 1.3.2 锻造性能

用锻压成型的方法获得优良锻件的难易程度称为锻造性能。锻造性能的好坏主要与金属的塑性和变形抗力有关，也与材料的成分和加工条件有很大的关系。塑性越好，变形抗力越小，金属的锻造性能越好。例如，黄铜和铝合金在室温状态下就有良好的锻造性能；碳钢在加热状态下锻造性能较好；铸铁、铸铝、青铜则几乎不能锻压。

### 1.3.3 焊接性能

焊接性能是指金属材料对焊接加工的适应性，也就是在一定的焊接工艺条件下，获得优质焊接接头的难易程度。碳钢和低合金钢的焊接性主要同金属材料的化学成分有关（其中碳的质量分数的影响最大）。如低碳钢具有良好的焊接性，高碳钢、不锈钢、铸铁的焊接性较差。

### 1.3.4 切削加工性能

金属材料的切削加工性能是指金属材料在切削加工时的难易程度。切削加工性能一般由工件切削后的表面粗糙度及刀具寿命等来衡量。影响切削加工性能的因素主要有工件的化学成分、组织状态、硬度、塑性、导热性和形变强化等。一般认为金属材料具有适当硬度（170~230 HBS）和足够的脆性时较易切削，从材料的种类而言，铸

铁、铜合金、铝合金及一般非合金钢都具有较好的切削加工性能。所以，铸铁比钢切削加工性能好，一般非合金钢比高合金钢切削加工性能好。改变钢的化学成分和进行适当的热处理是改善钢切削加工性能的重要途径。

## 复习思考题

1. 工程材料的性能包括哪几个方面？
2. 什么是金属的力学性能？金属的力学性能包括哪些？
3. 什么是变形？变形有哪两类？
4. 什么是内力？什么是应力？
5. 什么是强度？衡量强度的常用指标有哪些？各用什么符号表示？
6. 什么是塑性？衡量塑性的指标有哪些？各用什么符号表示？
7. 什么是硬度？常用的硬度试验法有哪几种？
8. 常用的洛氏硬度标尺有哪几种？各适用于测定哪些材料的硬度？
9. 有 4 种材料，它们的硬度分别为 378 HBS，45 HRC，79 HRA，474 HBW。试比较这 4 种材料硬度的高低。
10. 什么是冲击韧度？其值用什么符号表示？大能量一次冲击和小能量多次冲击的冲击抗力各取决于什么？
11. 什么是金属的疲劳现象？
12. 为什么疲劳断裂对机械零件危害性较大？如何提高零件的疲劳极限？
13. 什么是金属的工艺性能？主要包括哪些内容？

## 第二章 纯金属的晶体结构与结晶

### 学习指南 |

1. 理解金属晶体结构、晶体结构的缺陷等基本概念；
2. 了解金属的结晶过程及现象；
3. 理解金属的同素异构特性和现象；
4. 掌握常用的金属晶体结构类型及特点。

### 本章要点 |

1. 晶粒的大小对金属力学性能的影响；
2. 常用的金属晶体结构类型及特点。

### 本章难点 |

1. 理解金属的同素异构特性和现象；
2. 晶体结构的缺陷。

## 2.1 纯金属的晶体结构

金属材料是应用最广泛的工程材料，不同的金属材料表现出不同的力学性能，即使是同一种材料，在不同的条件下，其性能也有差异。金属材料的性能取决于材料的化学成分及其组织结构，从本质上说，是由金属材料的内部结构决定的。因此，掌握金属的内部结构、结晶规律及其对金属性能的影响，对于合理选材和加工金属材料具有非常重要的意义。

### 2.1.1 晶体结构的基础知识

#### 1. 晶体与非晶体

物质一般由原子构成。自然界的固态物质，根据其内部原子的聚集状态不同，可分为晶体和非晶体两大类。在物质内部，凡原子呈有序、有规则排列的固体称为晶体。绝大多数金属在固态下一般均属于晶体，如纯铁、纯铝、天然金刚石等；相反，凡原子呈无序堆积状态的，称为非晶体，例如沥青、普通玻璃、松香、树脂等均属于非晶体。

晶体与非晶体，由于原子排列方式不同，它们的性能也有差异。晶体具有固定的熔点，其性能呈各向异性；非晶体没有固定熔点，而且表现为各向同性。

## 2. 晶格与晶胞

通过 X 射线分析法得知，晶体内部原子是按一定的几何规律排列的。为了便于分析和描述晶体中原子排列的情况，把原子看成是一个小球，则金属晶体就是由这些小球有规律地堆积而成的物体，如图 2-1 所示。为了形象地表示晶体中原子排列的规律，可以将原子简化成一个点，用假想的线将这些点连接起来，构成有明显规律性的空间格架。这种表示原子在晶体中排列规律的空间格架叫作晶格，如图 2-2 (a) 所示。

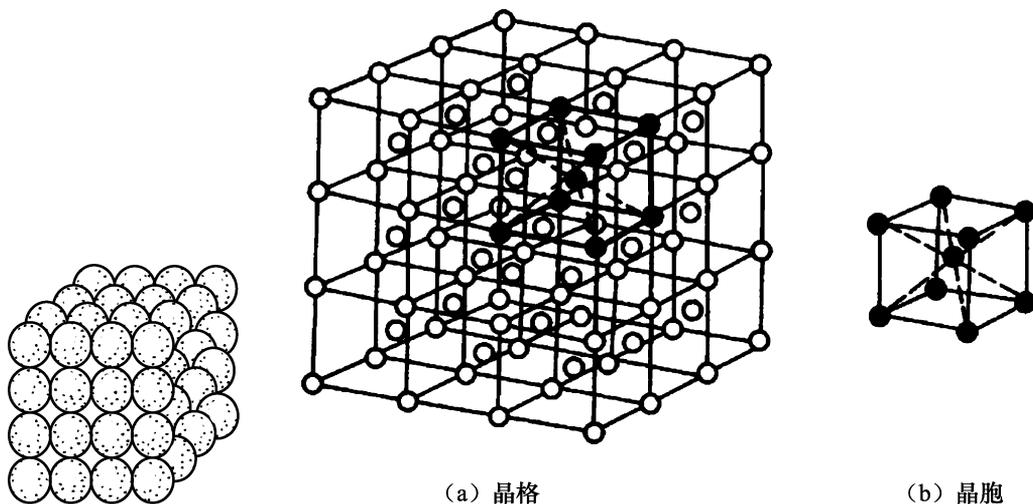


图 2-1 晶体原子排列示意图

图 2-2 晶格和晶胞示意图

由图 2-2 (a) 可见，晶格是由许多形状、大小相同的最小几何单元重复堆积而成的。晶体学中，能够完整地反映晶格特征（周期性，尤其是对称性）的最小几何单元称为晶胞，如图 2-2 (b) 所示。

## 3. 晶面和晶向

在晶体中由一系列原子组成的平面，称为晶面。如图 2-3 所示为简单立方晶格的一些晶面。

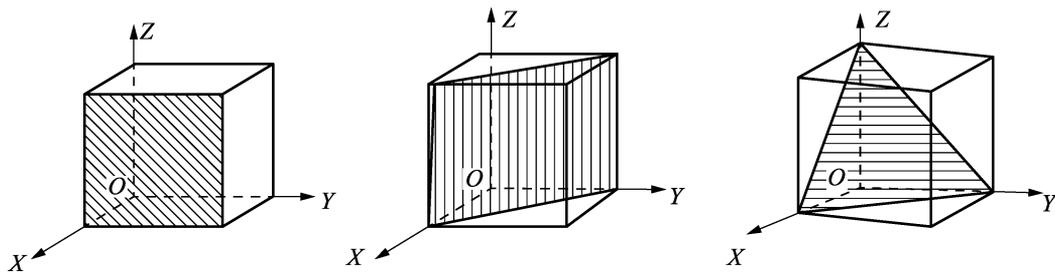


图 2-3 立方晶格中的一些晶面

通过两个或两个以上原子中心的直线，可代表晶格空间排列的一定方向，称为晶向，如图 2-4 所示。

由于在同一晶格的不同晶面和晶向上原子排列的疏密程度不同,因此原子结合力也就不同,从而在不同的晶面和晶向上显示出不同的性能,这就是晶体具有各向异性的原因。

### 2.1.2 金属的晶格类型

金属的晶格类型很多,但绝大多数(占90%)金属属于下面3种晶格中的一种。

#### 1. 体心立方晶格

它的晶胞是一个立方体,原子位于立方体的8个顶角上和立方体的中心,如图2-5所示。属于这种晶格类型的金属有铬(Cr)、钒(V)、钨(W)、钼(Mo)及 $\alpha$ -铁( $\alpha$ -Fe)等。

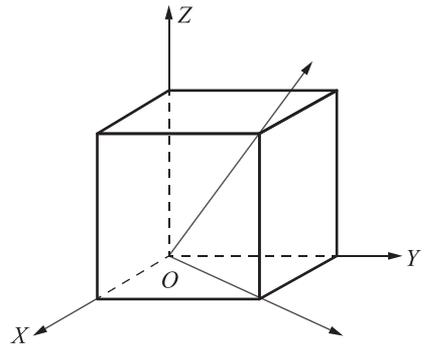


图 2-4 立方晶格中的几个晶向

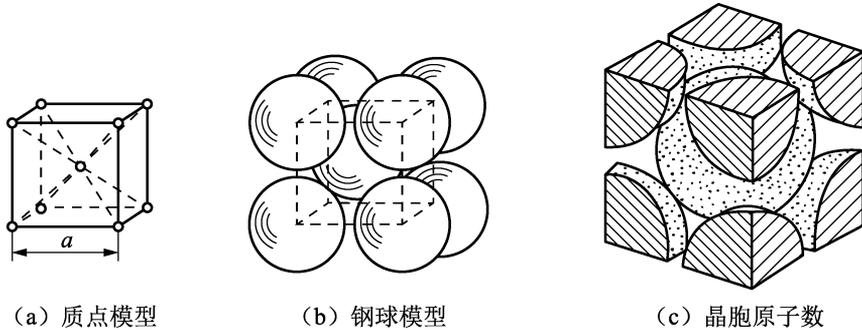


图 2-5 体心立方晶胞模型

#### 2. 面心立方晶格

它的晶胞也是一个立方体,原子位于立方体的8个顶角上和立方体6个面的中心,如图2-6所示。属于这种晶格类型的金属有铝(Al)、铜(Cu)、铅(Pb)、镍(Ni)及 $\gamma$ -铁( $\gamma$ -Fe)等。

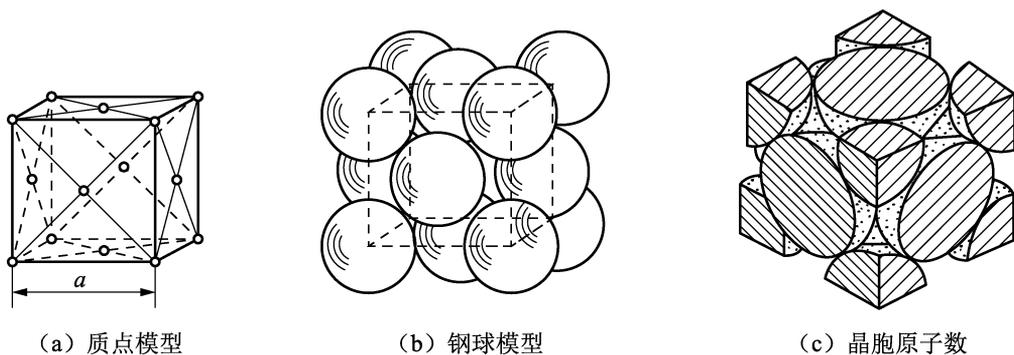


图 2-6 面心立方晶胞模型

### 3. 密排六方晶格

它的晶胞是一个正六棱柱体，原子排列在柱体的每个顶角上和上、下底面的中心，另外3个原子排列在柱体内，如图2-7所示。属于这种晶格类型的金属有镁（Mg）、铍（Be）、镉（Cd）及锌（Zn）等。

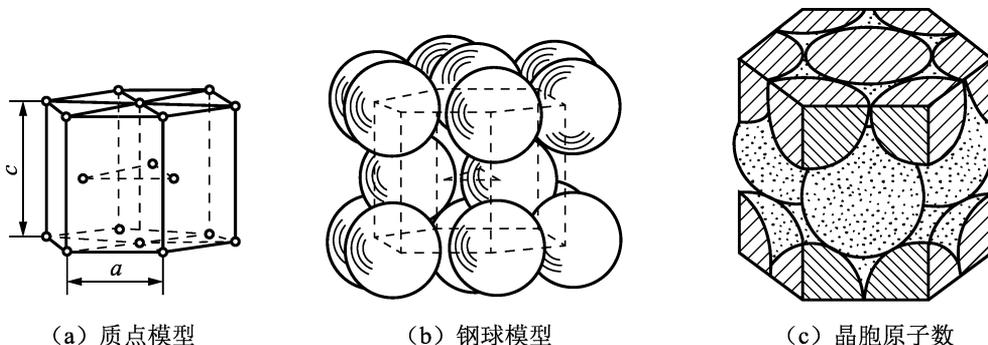


图 2-7 密排六方晶胞模型

#### 2.1.3 金属晶体结构的缺陷

在晶体内部，由于各种原因，导致原子的规则排列受到干扰和破坏，使其偏离理想结构，此即晶体缺陷。它对金属的性能有很大的影响。

根据几何特征，晶体缺陷分类如下：

(1) 点缺陷。最常见的点缺陷有空位、间隙原子和置换原子等，如图2-8所示。由于点缺陷的出现，周围原子发生“撑开”或“靠拢”的现象，这种现象称为晶格畸变。晶格畸变的存在，使金属产生内应力，晶体性能发生变化，如强度、硬度和电阻增加，体积发生变化。晶格畸变也是强化金属的手段之一。

(2) 线缺陷。线缺陷主要指的是位错。最常见的位错形态是刃型位错，如图2-9所示。这种位错的表现形式是晶体的某一晶面上，多出一个半原子面，它如同刀刃一样插入晶体，故称为刃型位错，在位错线附近一定范围内，晶格发生了畸变。

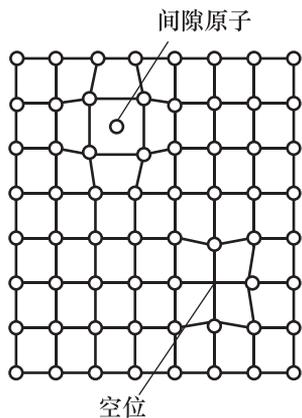


图 2-8 点缺陷示意图

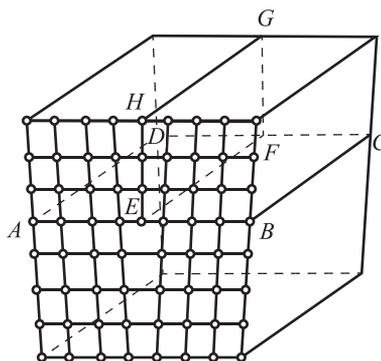


图 2-9 线缺陷示意图

(3) 面缺陷。通常指的是晶界和亚晶界。晶粒之间的边界称为晶界，晶界宽度为5~10个原子间距，如图2-10和图2-11所示。实际金属材料都是多晶体结构，多晶体中两个相邻晶粒之间晶格位向是不同的，所以晶界处是不同位向晶粒原子排列无规则的过渡层。晶界原子处于不稳定状态，能量较高，因此晶界与晶粒内部有着一系列不同的特性，例如，常温下晶界有较高的强度和硬度；晶界处原子扩散速度较快；晶界处容易被腐蚀、熔点低等。

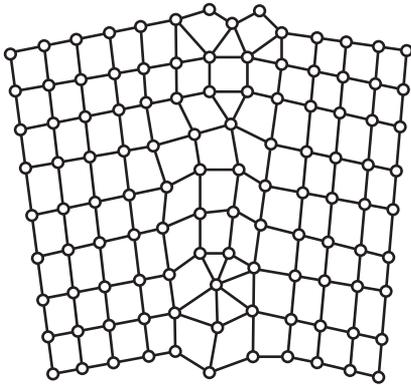


图 2-10 晶界的过渡结构示意图

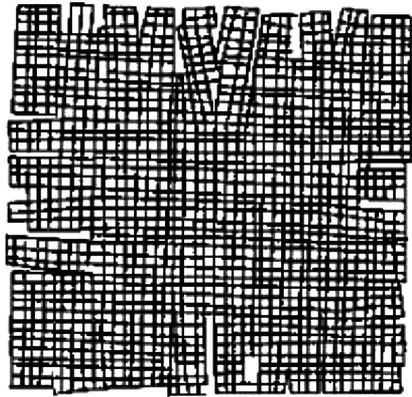


图 2-11 亚晶界示意图

## 2.2 纯金属的结晶

金属材料一般在液态下冶炼，然后铸造成固态金属。由液态金属转变为固态金属的过程就是金属的结晶。在工业生产中，金属的结晶决定了铸锭、铸件及焊接件的组织和性能。如何控制结晶成为提高金属材料性能的手段之一。研究金属结晶的目的是要掌握金属结晶的规律，提高产品的质量。

### 2.2.1 纯金属结晶的条件

纯金属结晶是指金属从液态转变为晶体状态的过程。纯金属有一定的熔点，理想条件下，在熔点温度时液、固共存，这时液体中原子结晶到固体上的速度与固体上的原子熔入液体中的速度相等，此状态称为动态平衡。金属的熔点即为理论结晶温度或平衡结晶温度。但实际上液态金属必须低于该金属的理论结晶温度才能结晶，通常把液体冷却到低于理论结晶温度的现象称为过冷。因此，使液态纯金属能顺利结晶的条件是过冷。理论结晶温度与实际结晶温度的差称为过冷度，过冷度的大小可用热分析法测定。热分析法装置如图2-12所示。

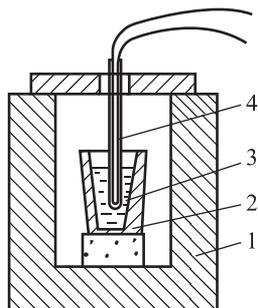


图 2-12 热分析法装置示意图

1—电炉；2—坩埚；3—金属液；4—热电偶

如果环境温度保持不变，把液态金属放在坩埚内，液态金属就以一定的速度冷却。在冷却过程中，每隔一定时间测量一次温度，再把测量结果绘制在“温度—时间”坐标图中，得到如图 2-13 所示的冷却曲线，图中  $T_0$  为金属的熔点（理论结晶温度）。在结晶之前，冷却曲线连续下降；当液态金属冷却到理论结晶温度  $T_0$  时却没有结晶，而是冷却到  $T_0$  以下的某个温度  $T_1$  时，液态金属才开始结晶。在结晶过程中，由于放出结晶潜热，补偿了冷却散失的热量，使结晶时的温度保持不变，在冷却曲线上出现水平阶段，对应温度  $T_1$  即为该金属的开始结晶温度。水平阶段延续的时间即结晶开始到结束的时间；结晶终了时，液态金属全部变成了固态金属，由于没有放出结晶潜热，固态金属温度按原来冷却速度继续下降。冷却曲线上出现的水平阶段，一般是液体正在结晶的阶段，这时的温度就是纯金属的实际结晶温度 ( $T_1$ )，过冷度的大小用下式表示：

$$\Delta T = T_0 - T_1$$

式中： $T_0$ ——理论结晶温度；

$T_1$ ——实际结晶温度；

$\Delta T$ ——过冷度。

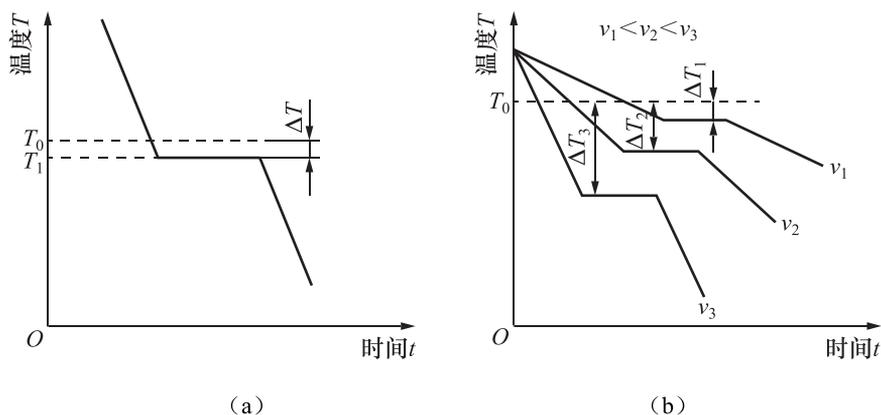


图 2-13 纯金属结晶时的冷却曲线

过冷度与金属的本性和液态金属的冷却速度有关。金属的纯度越高，结晶时的过冷度越大；同一金属冷却速度越大，则金属开始结晶温度越低，过冷度越大。因此，金属结晶必须在一定的过冷度下进行，过冷是金属结晶的必要条件。

### 2.2.2 纯金属结晶的一般过程

液态金属结晶过程分为形核和长大两个过程。金属结晶可用图 2-14 来描述，将液态金属冷却到某一温度，在一定过冷度的条件下，经过一段时间的孕育阶段，晶核以一定的速率生成，并以一定的线速度长大。剩余液态金属中不断产生新晶核并不断长大，当液体结晶速度达到 50% 左右时，各个晶粒开始相互接触，液体中可供结晶的空间减小，经过一段时间后液体全部凝固，结晶结束。

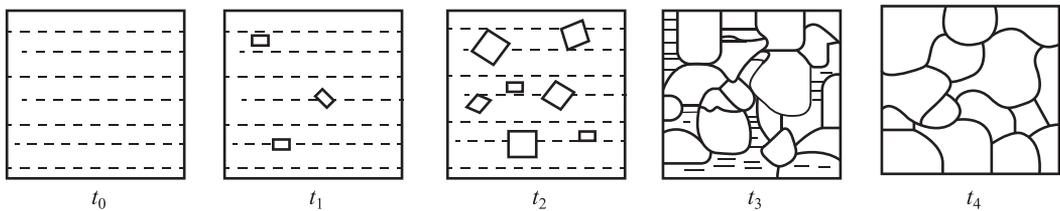
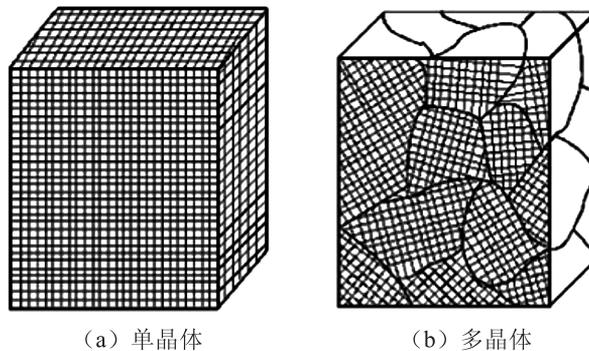


图 2-14 液态金属结晶过程示意图

结晶后只有一个晶粒的晶体称为单晶体，如图 2-15 (a) 所示。单晶体中的原子排列位向是完全一致的，其性能是各向异性的。如果结晶后的晶体是由许多位向不同的晶粒组成的，则称为多晶体，这些晶粒与晶粒之间的分界面称为晶界，如图 2-15 (b) 所示。由于多晶体内各晶粒的晶格位向互不一致，它们自身的各向异性彼此抵消，故显示出各向同性，也称为“伪各向异性”。



(a) 单晶体

(b) 多晶体

图 2-15 单晶体和多晶体结构示意图

## 1. 晶核的形成

晶核的形成有两种方式：自发行核和非自发行核。

液态金属中存在大量尺寸不同的短程有序原子团。这些原子团称为晶坯，在理论结晶温度以上时不稳定。当温度降到  $T_0$  以下且过冷度达到一定值后，液体具备了结

晶条件，液体中那些超过一定尺寸（大于临界尺寸）的短程有序的原子团不再消失，成为结晶的核心。

这种从液体内部自发生成结晶核心的方式称为自发形核。过冷度越大，金属由液态转变为固态的动力越大，能稳定存在的短程有序的原子团的尺寸越小，因此生成的自发晶核越多。当过冷度过大或温度过低时，由于原子的活动能力太低，生成晶核所需的原子的扩散受阻，形核的速率减小，所以形核率与过冷度有关。

分析金属结晶的实际，结晶时常不需要达到自发形核所对应的过冷度就开始形核，因为实际液态金属中含有一些杂质，杂质的存在常促使金属原子在其表面形核。此外，液态金属总是与铸模内壁相接触，晶核可以依附这些现成的固体表面形成。这种依靠外来质点作为结晶核心的方式称为非自发形核。按照结晶时的能量条件，基底与晶体结构及点阵常数越相近，其原子在接触面上越容易吻合，基底与晶核之间的界面能越小，减少形核时体系自由焓的增值，这样的基底促进了非自发晶核形成。当杂质的晶体结构和晶格常数与金属的结构相似或相当时，有利于形成非自发晶核，晶核优先依附于这些现成的表面而形成；有些难熔金属的晶体结构与金属的结构相差很大，但其表面的凹孔或裂缝有时残留未熔金属，也可以作为非自发形核的核心。在生产实际中，液态金属结晶时形核方式主要是非自发形核。

## 2. 晶核的长大

晶核长大的实质是原子由液体向固体表面的转移过程。纯金属结晶时，晶核长大的方式主要有平面长大和枝晶长大两种方式。晶体长大方式受冷却条件、晶体结构和杂质含量的影响。

当过冷度较小时，晶核主要以平面长大方式进行长大，晶核各表面的长大速度遵守表面能最小的法则，即晶核长成的规则形状应使总的表面能趋于最小。晶核沿不同方向的长大速度不同，以沿原子最密排面垂直方向的长大速度最慢，表面能增加缓慢。所以平面长大的结果是使晶核获得表面为原子最密排面的规则形状。当过冷度较大时，晶核主要以枝晶的方式长大，如图 2-16 所示。晶核长大初期，其外形为规则的形状，但随着晶核的生长，晶粒棱角形成，棱角在继续长大过程中，棱角处的散热条件优于其他部位，棱角处优先生长，沿一定部位生长出空间骨架，这种骨架类似于树干，称为一次晶轴；在一次晶轴增长的同时，在其侧面生长出的枝称为二次晶轴；随后又生长出三次晶轴等，如此不断生长和生枝，直到液体全部凝固，最后形成树枝状晶体。

枝晶的各次晶轴具有相同的固定方向，所以每个枝晶都是一个单晶体，而多晶体金属的每个晶粒一般由一个晶核以枝晶的方式长成。在枝晶成长过程中，由于液体的流动、晶轴本身重力的作用及相互间的碰撞和杂质元素的作用，某些晶轴发生偏移或折断，形成晶粒中的亚晶界、位错等各种缺陷。

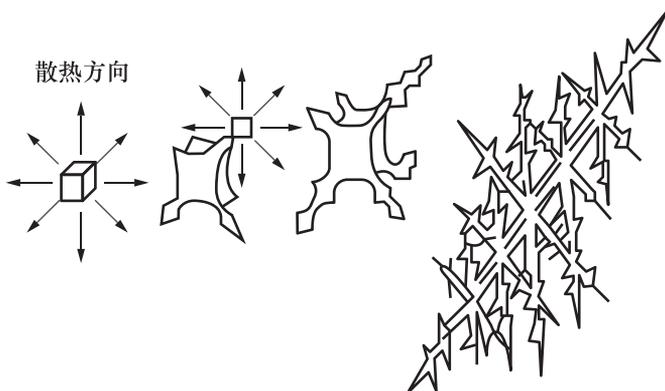


图 2-16 晶体枝晶成长示意图

晶核以树枝状长大的原因是晶核长大过程中释放出结晶潜热，晶粒棱角处散热较快，长大速度快，成为深入液体中的枝晶；棱角处缺陷较多，从液体中转移过来的原子容易固定，有利于枝晶生长；晶核以枝晶的方式生长，表面积大，有利于从液体中获得生长所需的原子。实际上，晶核长大的过程受冷却速度、散热条件及杂质的影响。控制好这些因素就可控制晶粒长大方式，最终达到控制晶体的组织和性能的目的。

### 2.2.3 晶粒大小及其控制

金属结晶后获得由大量晶粒组成的多晶体。对于金属材料，晶粒的大小与其力学性能相关。一般晶粒越细小，则金属的强度越高，塑性和韧性越好，见表 2-1。工程上通过控制金属结晶的过程细化晶粒，改善金属材料的力学性能。

表 2-1 晶粒长大对纯铁力学性能的影响

晶粒平均直径/mm	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	屈服强度 $\sigma_s$ /MPa	延伸率 $\delta$ /%	晶粒平均直径/mm	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	屈服强度 $\sigma_s$ /MPa	延伸率 $\delta$ /%
9.7	165	40	28.8	2.5	211	44	39.5
7.0	180	38	30.6	0.2	263	57	48.8

#### 1. 晶粒度的概念

晶粒的大小称为晶粒度，用单位面积上的晶粒数目或晶粒的平均线长度（或直径）表示。金属结晶后的晶粒度与形核速率和长大速度有关。形核速率越大，单位体积中生成的晶核数目越多，晶粒就越细小；若形核速率一定，长大速度越小，则结晶的时间越长，生成的晶核越多，晶粒越细小。从金属结晶的过程可知，凡是促进形核并抑制长大的因素都能细化晶粒。通过改变浇注温度和冷却条件，就可改变金属液相的过冷度，可以控制晶粒大小。

#### 2. 晶粒大小的控制

为了细化铸态的晶粒，提高金属材料的性能，可采取如下措施：

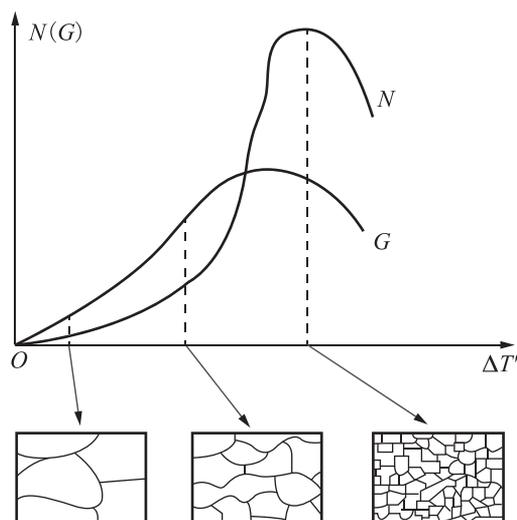


图 2-17 形核速率和长大速度与过冷度的关系

(1) 增加过冷度。金属结晶时，形核速率  $N$  和长大速度  $G$  都与过冷度有关，如图 2-17 所示。随着过冷度的增加，形核速率  $N$  和长大速度  $G$  增加，并在一定过冷度下达到最大值，但随着过冷度的进一步增加，两者都会减小。这是由于温度过低时，液体中原子扩散困难， $N$  和  $G$  都随之减小。在生产中冷却条件往往处于曲线的左边部分，而曲线的右边部分的冷却条件在实际中难以实现。所以，随着过冷度的增加，形核速率  $N$  和长大速度  $G$  都增加，但形核速率  $N$  增加得更快，故  $N/G$  增大，使晶粒细化。

(2) 变质处理（孕育处理）。在液态金属中加入孕育剂或变质剂，增加非自发形核的数目，促进形核，抑制晶核长大，达到细化晶粒的目的。加变质剂包括在浇铸前向液体金属中加入同类金属细粒，或加入结构完全对应的高熔点物质细粒，在液相中直接起外来晶核的作用。如浇铸高铬钢时加入铬铁粉。在液态金属中加入少量的某些元素，形成稳定的化合物作为活性质点，可促进非自发形核。如在钢液中加入钛、钒和铌等形成碳化物作为活性质点；铝液中加入钛、锆作为活性质点也能起到非自发形核的核心作用。有些物质不能提供结晶核心，却能阻止晶粒长大，如液态金属中加入少量的表面活性元素，能附着在晶核的结晶前沿，阻碍晶核长大。如钢液中加入硼。

(3) 附加振动。在金属结晶过程中，对其采用机械振动、超声波振动、电磁振动及搅拌等方法，能够打碎、折断正在长大的枝晶，不仅使已形成的晶粒因破碎而细化，且破碎的细小枝晶起到新晶核的作用，增加了结晶的核心，达到细化晶粒的目的。

## 2.3 金属的同素异构转变

大多数金属在结晶完成后，晶格类型不再发生变化，但有少数金属如铁、锰、锡、钛等在结晶后继续冷却时，其晶格类型会发生一定的变化。金属在固态下由一种晶格类型转变成另一种晶格类型的变化称为同素异构转变，由同素异构转变得到的不同晶格类型的晶体称为同素异形体。

铁是典型的具有同素异构转变特性的金属。如图 2-18 所示是纯铁的冷却曲线，表示了纯铁的结晶和同素异构转变的过程。液态纯铁在  $1538\text{ }^{\circ}\text{C}$  时结晶成具有体心立方晶格的  $\delta\text{-Fe}$ ；继续冷却到  $1394\text{ }^{\circ}\text{C}$  时发生同素异构转变，体心立方晶格的  $\delta\text{-Fe}$  转变为

面心立方晶格的  $\gamma$ -Fe；继续冷却到  $912\text{ }^{\circ}\text{C}$  时又发生同素异构转变，面心立方晶格的  $\gamma$ -Fe 转变为体心立方晶格的  $\alpha$ -Fe；再继续冷却，晶格的类型不变。

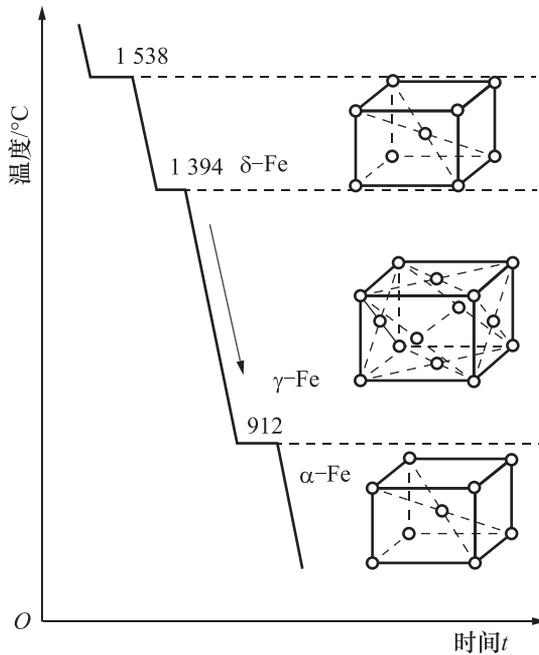


图 2-18 纯铁的冷却曲线

## 复习思考题

1. 晶体与非晶体的主要区别是什么？
2. 试用晶面、晶向的知识说明晶体具有各向异性的原因。
3. 金属晶格的常见类型有哪几种？试绘出它们的晶胞示意图。
4. 金属晶体中的结构缺陷有哪几种？它们对金属的力学性能有何影响？
5. 什么是金属的结晶？
6. 什么是过冷现象和过冷度？过冷度与冷却速度有什么关系？
7. 纯金属的结晶是由哪两个基本过程组成的？
8. 什么是晶粒和晶界？
9. 晶粒大小对金属的力学性能有什么影响？细化晶粒的常用方法有哪几种？
10. 说出纯铁同素异构转变的温度及在不同温度范围内的晶体结构。