

# 工程材料与机械制造

刘建华 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

## 本书特点:

1. 以“材料——成形工艺原理和方法——机械制造加工——零件的结构工艺性”为主线,使内容层次分明、系统性强。
2. 通过实例分析进行工艺规程编制,实践应用性强。
3. 基于注重能力培养的教学特点,在原理及方法理论之外有应用型内容——典型零件的成形工艺分析和成形材料、成形方法选择及机械加工工艺设计等实例,以培养学生分析和解决实际问题的能力。
4. 关注材料发展及前沿的新技术、新工艺,在一定程度上反映材料科学与工程学科的新成果,以适应当前科技发展的需要。



机械工业出版社微信公众号

ISBN 978-7-111-63179-8

策划编辑◎张秀恩 / 封面设计◎严娅萍

ISBN 978-7-111-63179-8



9 787111 631798 >

定价: 59.00元

2019

# 工程材料与机械制造

主 编 刘建华

参 编 朱 蕾 李 珂 李昆鹏 宋绪丁



机械工业出版社

本书是高等工科院校机械类本科各专业的技术基础课程的教材，主要阐述：工程中常用材料的分类、成分、组织、性能特点，各种材料的成形原理、方法、成形工艺特点及其应用；机械制造基础知识，常用机械加工方法及特点，加工工艺规程制订。本书主要内容包括金属材料及热处理，铸造、压力加工、焊接等成形技术，粉末冶金、工程塑料及其成形，机械制造基础知识，常用机械加工方法及加工工艺规程制订，并简要地介绍了先进成形方法。每章均附有一定数量的思考题与习题。

本书可作为高等工科院校机械类及近机械类专业的教材，还可作为职工大学、成人大学、广播电视大学的专业基础课程教材和工程技术人员参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

工程材料与机械制造/刘建华主编. —北京：机械工业出版社，2019.8  
ISBN 978-7-111-63179-8

I. ①工… II. ①刘… III. ①工程材料②机械制造工艺 IV. ①TB3  
②TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 148569 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：张秀恩 责任编辑：张秀恩

责任校对：王明欣 张薇 封面设计：严娅萍

责任印制：张博

北京铭成印刷有限公司印刷

2019 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 24.5 印张 · 475 千字

0 001 — 2 500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-63179-8

定价：59.00 元

电话服务

客服电话：010 - 88361066

010 - 88379833

010 - 68326294

网络服务

机工官网：[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博：[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

金书网：[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

机工教育服务网：[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封底无防伪标均为盗版

# 前 言

材料是人类赖以生存和发展的物质基础。人类的生活、生产实践对材料不断提出新的要求。新材料的出现推动了人类的生活和生产进一步发展。近年来,随着现代科学技术、工业生产的迅猛发展和我国制造业大国地位的确立,对材料成形及制造加工工艺提出了新的、更高的要求。新材料和新工艺的发展已成为我国最重要和最有发展潜力的工业支柱产业之一,日益受到人们的重视。

本书是根据高等学校机械类专业的“工程材料与机械制造基础”课程改革和实践的要求,并结合多年教学实践经验编写而成的。在编写过程中,突出了以下特点:

1. 以“材料—成形工艺原理和方法—机械制造加工—零件的结构工艺性”为主线,使内容层次分明、系统性强。
2. 通过实例分析进行工艺规程编制,实践应用性强。
3. 基于注重能力培养的教学特点,在原理及方法理论之外有应用型内容——典型零件的成形工艺分析和成形材料、成形方法选择及机械加工工艺设计等实例,以培养学生分析和解决实际问题的能力。
4. 关注材料发展及前沿的新技术、新工艺,在一定程度上反映材料科学与工程学科的新成果,以适应当前科技发展的需要。

本书的适用面广,既适用于机械类各专业,如机械设计制造及自动化、车辆工程等专业,也适用于近机械类专业,如自动化、工业工程、电气工程及其自动化等专业。在授课过程中,可根据专业的特点,有选择地讲授。

参加本书编写的有长安大学宋绪丁(第1章),刘建华(第2章,第3章),李珂(第4章,第9章),朱蕾(第5章,第6章),李昆鹏(第7章,第8章,第10章,第11章)。全书由刘建华主编。全书由张涛、张伟社教授审阅,并提出了许多宝贵意见,在此表示感谢!

由于水平有限,书中难免会有不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

# 目 录

## 前言

### 第1章 金属材料及热处理····· 1

1.1 金属材料的主要性能····· 1

1.2 金属的晶体结构及结晶····· 7

1.3 铁碳合金····· 12

1.4 常用金属材料····· 21

1.5 常用金属材料的热处理····· 27

思考题与习题····· 39

### 第2章 铸造成形技术····· 41

2.1 合金的铸造性能····· 41

2.2 常用铸造合金及铸造方法····· 52

2.3 砂型铸造工艺设计····· 71

2.4 铸造结构工艺性····· 82

思考题与习题····· 91

### 第3章 压力加工成形技术····· 94

3.1 压力加工成形方法····· 94

3.2 金属材料的塑性成形基础····· 97

3.3 锻造····· 103

3.4 冲压····· 121

3.5 特种压力加工····· 137

思考题与习题····· 150

### 第4章 焊接成形技术····· 153

4.1 焊接冶金过程及常用焊接方法····· 154

4.2 焊接接头的组织与性能····· 171

4.3 焊接性及常用金属材料的焊接····· 173

4.4 焊接应力与焊接变形····· 177

4.5 焊接结构工艺设计····· 183

思考题与习题····· 191

### 第5章 粉末冶金及其成形技术····· 193

5.1 粉末冶金基础····· 193

5.2 粉末冶金工艺过程····· 197

5.3 粉末注射成形技术····· 205

5.4 粉末冶金制品的结构工艺性和缺陷分析····· 209

思考题与习题····· 215

### 第6章 工程塑料及其成形技术····· 216

6.1 工程塑料····· 216

6.2 工程塑料成形工艺····· 223

6.3 塑料制品的结构工艺性····· 235

6.4 塑料的加工与表面处理技术····· 240

思考题与习题····· 245

### 第7章 其他工程材料与材料选择····· 246

7.1 其他工程材料····· 246

7.2 选择材料成形方法的原则····· 259

7.3 材料成形方法的选择····· 261

思考题与习题····· 264

### 第8章 金属切削加工的基础知识····· 265

8.1 切削运动和切削要素····· 265

8.2 金属切削刀具····· 268

8.3 金属的切削过程····· 277

8.4 加工质量和生产率····· 286

8.5 材料的切削加工性····· 288

思考题与习题····· 289

### 第9章 常用切削加工方法····· 291



9.1 车削加工 .....	291	10.3 工件的安装和夹具 .....	332
9.2 钻镗加工 .....	293	10.4 工艺规程的制订 .....	335
9.3 刨削、插削和拉削加工 .....	303	10.5 典型零件工艺过程 .....	362
9.4 铣削加工 .....	306	思考题与习题 .....	373
9.5 磨削加工 .....	312	<b>第 11 章 零件的结构工艺性</b> .....	376
9.6 光整加工 .....	322	11.1 零件结构工艺性的基本概念	
思考题与习题 .....	326	及要求 .....	376
<b>第 10 章 机械加工工艺工程</b> .....	327	11.2 零件机械加工的结构	
10.1 主要表面加工方法的选择 .....	327	工艺性 .....	376
10.2 机械加工工艺过程的基本		思考题与习题 .....	383
概念 .....	330	<b>参考文献</b> .....	385

# 第 1 章 金属材料及热处理

金属材料是现代机械制造工业中应用最广泛的材料之一，在各种机械设备中所占的比例为 90% 以上。金属材料具有优良的物理、化学和力学性能，以及良好的成形工艺性能。

金属材料通常分为黑色金属和有色金属两大类，其性能主要与其成分、组织和表面结构特性有关。而热处理是通过改变金属材料的组织和改变表面成分及组织来改变其性能的一种热加工工艺。

## 1.1 金属材料的主要性能

金属材料的性能主要是指在加工和使用过程中所表现出来的特性。它包括使用性能和工艺性能两个方面。在使用过程中所表现出来的特性为使用性能，包括物理性能、化学性能和力学性能。金属材料的使用性能决定了其可靠性和使用寿命等，从而决定了其应用范围。金属材料在加工过程中所表现出来的特性为工艺性能，包括铸造、压力加工、焊接、切削加工、热处理等方面的性能。

金属材料的力学性能是指金属材料在受外力作用时表现出来的性能。金属零件或构件在工作时承受不同的外力作用，相应地就有不同的力学性能指标，而这些力学性能指标又是通过不同的试验测定的，常用的有拉伸试验、冲击试验、硬度试验和疲劳试验。根据零件的使用温度不同，有室温力学性能指标和高温力学性能指标。

### 1.1.1 室温下的力学性能指标

室温下的力学性能指标包括刚度、强度、塑性、硬度、冲击韧度和疲劳强度。拉伸试验是工业上广泛采用的力学性能试验方法之一，可测定金属材料的刚度、强度和塑性等。

拉伸试验是在拉伸试验机上进行的。把一定尺寸和形状的金属试样(图 1-1a)装夹在试验机上，然后对试样逐渐施加拉伸载荷，直至把试样拉断为止。图 1-1b 所示为低碳钢的应力 - 应变曲线。图中纵坐标为应力  $R$ 、横坐标为应变  $e$ ，拉伸过程中的变形可分为五个阶段。如图中  $Oa$  段是弹性变形阶段，是一条斜直线。材料在外力作用下发生变形，若外力去除后变形随之消失，这种变形称为弹性变形。当拉伸外力继续增加时，试样进一步发生变形，此时若除去外



力，弹性变形消失，而保留了微量变形，这种不能恢复的变形称为塑性变形（永久变形），即图中  $ab$  段为微量塑性变形阶段。当载荷超过  $b$  点时，曲线上出现一段水平线段或锯齿线，此时载荷不增加，而试样的塑性变形量却继续增大，这种现象称为屈服现象。随着载荷的不断增大，塑性变形增大，载荷到达  $e$  点载荷时，为材料所能承受的最大载荷，即图中  $ce$  段，为强化阶段。当载荷超过最大载荷以后，试样局部截面缩小，产生局部缩颈现象，随后试样继续伸长，所受载荷迅速减小直至在颈缩处断裂，即图中  $ef$  段，为缩颈阶段。

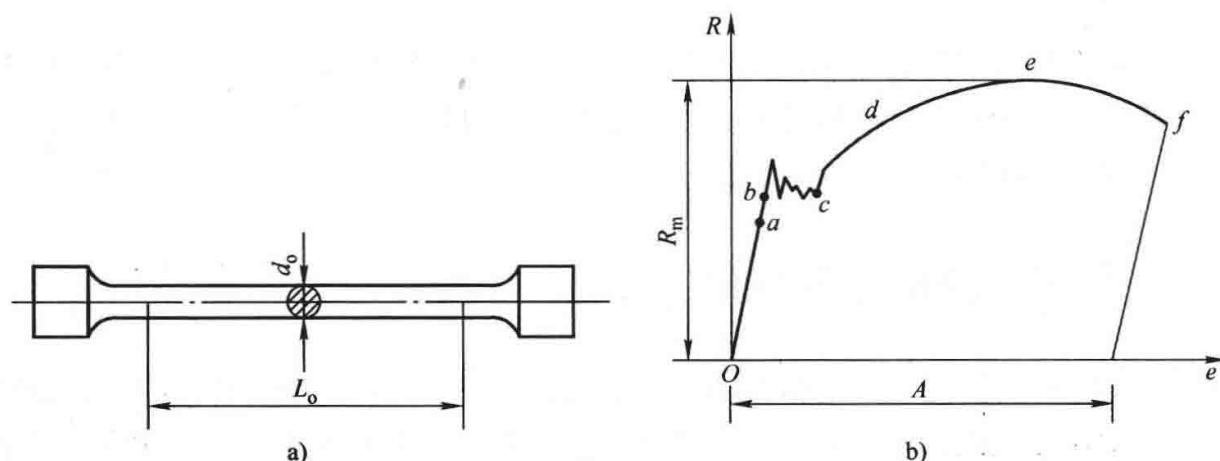


图 1-1 低碳钢的拉伸试验

### 1. 刚度

刚度是指零（构）件在受外力时抵抗弹性变形的能力，它等于材料弹性模量与零（构）件截面面积的乘积。因此衡量材料刚度的指标是弹性模量  $E$ ，其值的大小反映金属材料弹性变形的难易程度。在其他参数一定的情况下，构件材料弹性模量  $E$  越大，表明构件刚度越大，在外力作用下产生的弹性变形越小。弹性模量  $E$  主要取决于材料中原子本性和原子间结合力。熔点高低可以反映原子间结合力强弱，通常材料的熔点越高，其弹性模量也越高。另外，弹性模量对温度很敏感，随温度升高而降低。处理方法（如热处理、冷加工和合金化等）对  $E$  值影响很小。另外，对同一种材料增加横截面面积或改变截面形状，可以提高其刚度。一般机械零件大多在弹性状态下工作，要求零件具有一定的刚度。例如，发动机的机座和机体直接或间接支承着曲轴、连杆、活塞等运动件和其他零件，因此要求机座和机体必须有足够的刚度，以保证零件之间正确的相对位置和各自的运动状态。

### 2. 强度

强度是金属材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力。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五种。工程上常用零件受拉时的屈服强度和抗拉强度为指标。



(1) 屈服强度 屈服强度是指当金属材料呈现屈服现象时,在试验期间达到塑性变形发生而力不增加的应力点,区分为上屈服强度  $R_{eH}$  和下屈服强度  $R_{eL}$ ,如图 1-2 所示。它表示材料抵抗微量塑性变形的能力,是设计和选材的主要依据之一。上屈服强度  $R_{eH}$  为试件发生屈服,而力首次下降前的最大应力。下屈服强度  $R_{eL}$  指在屈服期间,不计初始瞬间效应时的最小应力。屈服强度越大,其抵抗塑性变形的能力越强,越不容易发生塑性变形。

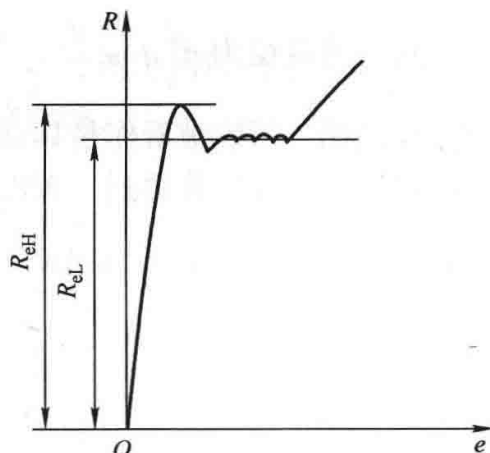


图 1-2 应力-应变曲线中上、下屈服强度

(2) 抗拉强度 材料在常温和载荷作用下发生断裂前的最大应力称为抗拉强度,用符号  $R_m$  表示,单位为  $N/mm^2$  或  $MPa$ 。它表示材料抵抗断裂的能力。 $R_m$  越大,材料抵抗断裂的能力越强。

### 3. 塑性

金属材料在外力作用下产生塑性变形而不破坏的能力称为塑性。许多零件和毛坯是通过塑性变形而成形的,要求材料有较高的塑性,并且为防止零件工作时脆断,也要求材料有一定的塑性。塑性也是金属材料的主要力学性能指标之一。通过拉伸试验,可测定金属材料的塑性指标。常用的塑性指标有断后伸长率  $A$  和断面收缩率  $Z$ 。其计算公式分别为

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%, \quad Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%$$

式中  $L_0$  和  $L_u$ ——试样的原始长度 (mm) 和拉断时对应长度 (mm);

$S_0$  和  $S_u$ ——试样的原始横截面面积 ( $mm^2$ ) 和断后缩颈处最小横截面面积 ( $mm^2$ )。

$A$  和  $Z$  的数值越大,表示金属材料的塑性越好。一般把  $A \geq 5\%$  的材料称为塑性材料,把  $A < 5\%$  的材料称为脆性材料。例如,铸铁是典型的脆性材料;低碳钢是黑色金属中塑性最好的材料,其良好的塑性既能保证压力加工和焊接的顺利进行,又能保证零件工作时安全可靠,防止突然断裂。

### 4. 硬度

硬度是金属材料局部抵抗硬物压入其表面的能力或金属材料表面抵抗局部塑性变形的能力。常用的硬度测定方法有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等测试方法。

(1) 布氏硬度测试法 GB/T 231.1—2018 规定,以一定的试验力  $F$ ,将直径为  $D$  的碳化钨合金球压入被测金属表面(图 1-3)并保持一定时间后卸去试验



力, 得到平均直径为  $d\left(d = \frac{d_1 + d_2}{2}\right)$  的压痕, 布氏硬度与试验力除以压痕表面积  
积的商成正比。压痕被看作是具有一定半径的球形。压痕的表面积通过压痕的平  
均直径和压头直径计算得到。布氏硬度以 HBW 表示, 即

$$\begin{aligned} \text{HBW} &= \text{常数} \times \frac{\text{试验力}}{\text{压痕表面积}} \\ &= 0.012 \frac{F}{\pi Dh} \\ &= 0.012 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \end{aligned}$$

布氏硬度表示为“硬度值 HBW 球  
头直径/试验力大小/试验力保持时  
间”, 如 170HBW10/1000/30 表示用直  
径 10mm 的硬质合金球, 在 1000kgf  
(9807N) 的试验力作用下, 保持 30s  
时测得的布氏硬度值为 170HBW。

布氏硬度测量精度较高, 但因压  
痕较深且面积大, 故不适宜测试太薄  
的试样和成品零件的硬度。

(2) 洛氏硬度测试法 用一定的  
试验力, 将压头 (金刚石圆锥、硬质  
合金球) 压入被测金属表面, 根据压  
痕的深度确定被测金属材料硬度值的  
方法称为洛氏硬度测试法。

根据所加试验力的大小和压头类型  
不同, 测量范围和应用范围也不同, 部分洛氏硬度试验力及应用范围见表 1-1。

表 1-1 部分洛氏硬度试验力及应用范围 (GB/T 230.1—2009)

符号	应用范围	压头类型	总试验力/N
HRA	20 ~ 88HRA	金刚石圆锥	588.4
HRB	20 ~ 100HRB	直径 1.588mm 球	980.7
HRC	20 ~ 70HRC	金刚石圆锥	1471
HRD	40 ~ 77HRD	金刚石圆锥	980.7
HRE	70 ~ 100HRE	直径 3.175mm 球	980.7
HRF	60 ~ 100HRF	直径 1.588mm 球	588.4
HRC	30 ~ 94HRC	直径 1.588mm 球	1471
HRH	80 ~ 100HRH	直径 3.175mm 球	588.4
HRK	40 ~ 100HRK	直径 3.175mm 球	1471

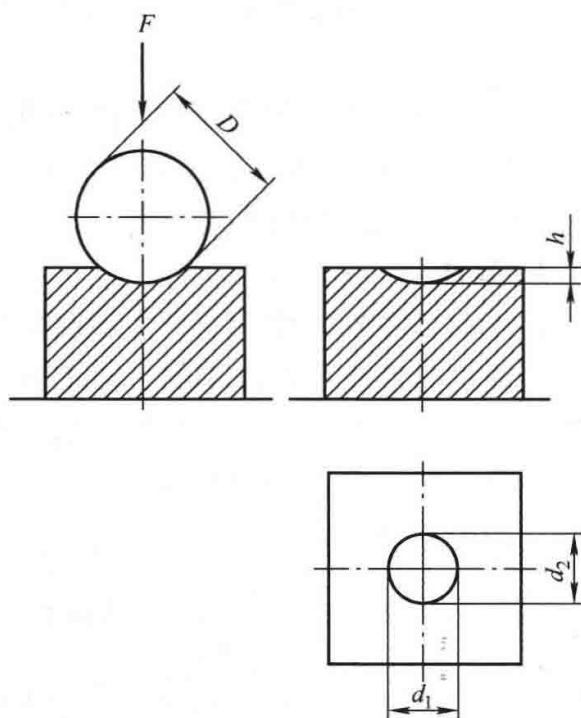
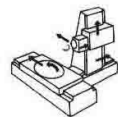


图 1-3 布氏硬度试验原理



洛氏硬度测试法测硬度简便、迅速、压痕小，可测定的材料范围广。但压痕小，对组织和硬度不均匀的材料，所测结果不够准确，因此，需在试件上测定三点取其平均值。

(3) 维氏硬度测试法 维氏硬度是采用夹角为  $136^\circ$  的四棱锥体金刚石压头，用一定的试验力压入材料的表面，保持规定时间后，卸除试验力，测量试样表面压痕对角线长度计算的硬度，即为维氏硬度，用 HV 来表示。维氏硬度表示为“硬度值 HV 试验力/试验力保持时间”，如 640HV30/20 表示在试验力为 30kgf (294.2N) 的作用下保持 20s 的硬度值为 640。

### 5. 冲击韧度

金属材料抵抗冲击载荷作用而不破坏的能力，是评价材料在冲击载荷作用下的脆断倾向，由冲击韧度反映。

冲击韧度通常采用夏比摆锤冲击试验测定。夏比摆锤冲击试验是将规定几何形状的缺口试样置于试验机两支座之间，缺口背向打击面放置，摆锤从一定高度落下，试样在一次冲击下被冲断。在这一过程中，试样所吸收能量称为冲击吸收能量，用  $K$  表示。常用的试样缺口有 U 型和 V 型缺口两种，测得的冲击吸收能量分别表示为  $KU$  和  $KV$ 。如  $KU_2$  表示 U 型缺口冲击试样在 2mm 摆锤刀刃下的冲击吸收能量。冲击吸收能量越大，说明材料的冲击韧度越好。

### 6. 疲劳强度

许多机械零件如发动机的曲轴、连杆、齿轮、弹簧等都是 在交变载荷下工作的。所谓交变载荷，是指载荷的大小、方向随时间发生周期性变化的载荷。零件在交变载荷下经过较长时间的工作而发生突然断裂的现象叫疲劳。例如，气阀上的弹簧经常发生折断，通常是由于工作时弹簧产生疲劳所致。据统计，在机械零件断裂失效中有 80% 以上属于疲劳断裂。

大量试验证明，应力减小，试样能经受的交变载荷循环次数增加，而且应力越小，试样能经受的循环次数越多。图 1-4 所示钢的交变应力  $S$  与循环次数  $N$  的关系曲线，叫作  $S-N$  应力寿命曲线。从该曲线中可以看出，当应力低于一定值时，试样可以经受无限周期循环而不破坏，这个应力值称为疲劳强度或疲劳极限，用  $\sigma_{-1}$  表示。

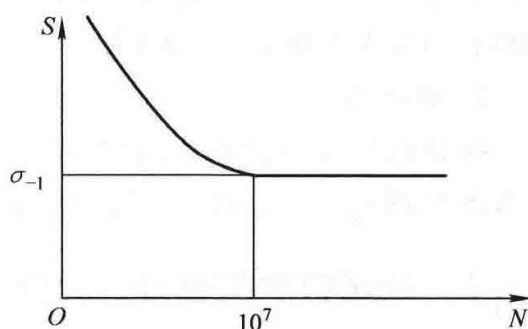


图 1-4 应力寿命曲线

实际上，要实现无限次交变载荷试验是不可能的。一般黑色金属取循环周次为  $10^7$  时能承受的最大循环应力为疲劳强度，有色金属、高强度钢等取  $10^8$  次。



为提高零件的疲劳强度,可采取改善零件的结构形状,减小零件的表面粗糙度值,提高表面加工质量和应用化学热处理、表面淬火、喷丸处理、表面滚压等各种表面强化处理的方法。

### 1.1.2 高温下的力学性能指标

柴油机的排气阀、涡轮增压器的涡轮叶片、高压蒸汽锅炉等零件长期在高温条件下运转,高温下材料的强度随温度升高、加载时间延长而降低。金属长时间在高温和载荷作用下,即使应力小于屈服强度也会缓慢发生塑性变形的现象称为蠕变。温度越高,蠕变越严重,甚至会导致零件断裂。对于一般金属,当温度超过 $(0.3 \sim 0.4) T_m$  ( $T_m$ 为材料的熔点,以K为单位)时会出现较明显的蠕变。

金属材料高温力学性能的评定,在室温力学性能基础上,还需加入温度和时间两个因素。金属在高温下的力学性能指标有高温强度(又称热强度)和热硬性。

#### 1. 高温强度

高温强度是应力、应变、温度和时间综合作用的反映。其指标为蠕变强度和持久强度。

(1) 蠕变强度 蠕变强度是金属材料长期在高温和载荷的作用下抵抗塑性变形的能力。以符号  $R_{A/t}^T$  表示,单位为 MPa,即在给定温度  $T$  (单位为 $^{\circ}\text{C}$ ) 下和规定时间  $t$  (单位为 h) 内,使试样产生一定的蠕变总变量  $A$  (%) 的应力值。 $R_{1/10^5}^{500} = 100\text{MPa}$  表示材料在  $500^{\circ}\text{C}$  温度下,  $10^5$  h 后总变形量为 1% 的蠕变强度为 100MPa。

(2) 持久强度 持久强度是金属材料长期在高温和载荷作用下抵抗断裂的能力。在给定温度  $T$  (单位为 $^{\circ}\text{C}$ ) 和规定时间  $t$  (单位为 h) 内,使试样发生断裂的应力,以符号  $R_t^T$  表示。例如  $R_{1000}^{700} = 300\text{MPa}$  表示材料在  $700^{\circ}\text{C}$  温度下经 1000h 后的持久强度为 300MPa。

#### 2. 热硬性

热硬性是金属材料在高温下保持较高硬度的能力。热硬性是高温下工作的机器零件和高速切削刀具的主要力学性能指标。

### 1.1.3 金属材料的物理、化学及工艺性能

#### 1. 物理性能

金属材料的物理性能是指在重力、电磁场、温度等物理因素作用下,材料所表现的性能或固有属性,主要包括密度、熔点、导电性、导热性、热膨胀性、磁性等。金属材料的物理性能对于选材、热加工工艺等方面有较大的影响。如为降低重量,可选择密度小的铝合金材料;而散热器、热交换器则可选用导热性好的



铜合金作为热交换元件。

## 2. 化学性能

金属材料的化学性能是指材料抵抗其周围介质侵蚀的能力，主要包括耐蚀性和抗氧化性。

(1) 耐蚀性 耐蚀性是指金属材料在常温下抵抗氧、水蒸气及其他化学介质腐蚀破坏作用的能力。根据介质侵蚀能力的强弱，对于不同介质中工作的金属材料的耐蚀性要求也不相同，如海洋设备及船舶用钢，应耐海水和海洋大气腐蚀；而贮存和运输酸类的容器、管道等，则应具有较高的耐酸性能。一种金属材料在某种介质、某种条件下是耐腐蚀的，而在另一种介质或条件下就可能不耐腐蚀，如镍、铬不锈钢在稀酸中耐腐蚀，而在盐酸中不耐腐蚀；铜及铜合金在大气中耐腐蚀，在氨水中却不耐腐蚀。

(2) 抗氧化性 抗氧化性是指金属材料在加热时抵抗氧化作用的能力。在高温（高压）下工作的锅炉、各种加热炉、内燃机中的零件等都要求具有良好的抗氧化性。

## 3. 工艺性能

金属材料的工艺性能是指它在加工、制造过程中表现出来的特性，主要包括铸造、压力加工、焊接、切削加工、热处理等方面的性能。这些性能将在后续章节中分别介绍。

# 1.2 金属的晶体结构及结晶

金属材料的结构是指组成金属材料的原子（或离子、分子）的聚集状态。金属材料的结构决定了材料的性能。因此，了解金属的内部微观结构及其对金属性能的影响，对于选用和加工金属材料具有非常重要的意义。

## 1.2.1 金属的晶体结构

### 1. 晶体和非晶体

自然界中一切物质都是由原子组成的，根据固态物质内部原子的聚集状态，固体分为晶体和非晶体两大类。

原子按规则排列的物质称为晶体，如冰、结晶盐、金刚石、石墨及固态金属等；反之，原子无规则排列的物质称为非晶体，如沥青、玻璃、松香等。

### 2. 金属的晶体结构

金属晶体是由许多金属原子（或离子）按一定的几何形式规则地排列而成，如图 1-5a 所示。为了便于研究各种晶体内部原子排列的规律，把每一个原子假想为一个几何结点，并用直线将其中心连接起来形成空间框架，称为晶格或点



阵，如图 1-5b 所示。晶格中不同原子组成的平面称为晶面。晶体是由层层晶面堆砌而成的，晶格中由原子组成的任一直线，都能代表晶体空间的一个方向，称为晶向。晶格的最小几何单元称为晶胞，如图 1-5c 所示。

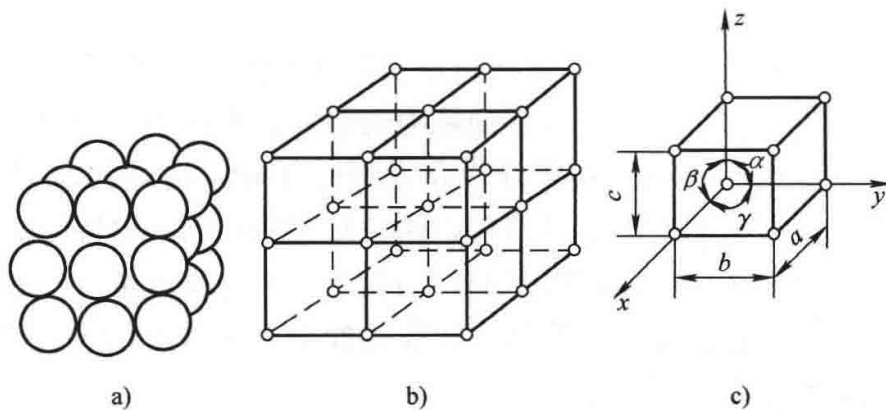


图 1-5 晶体结构示意图

a) 晶体模型 b) 晶格 c) 晶胞

晶胞可以描述晶格的排列规律，晶胞的结构就是该金属的晶格结构，不同的晶格结构具有不同的性能，而相同的晶胞类型若有不同的晶格常数，也会使金属具有不同的性能。

### 3. 常见金属的晶体结构

在金属原子中，约有 90% 以上的金属晶体都属于以下三种晶格结构。

(1) 体心立方晶格 如图 1-6a 所示，体心立方的晶胞是一个正立方体。原子位于立方体的中心和八个顶点上，顶点上的每个原子为相邻的八个晶胞所共有。属于这种晶格类型的金属有铬 (Cr)、钨 (W)、钼 (Mo)、钒 (V) 及  $\alpha$ -Fe 和  $\delta$ -Fe 等。

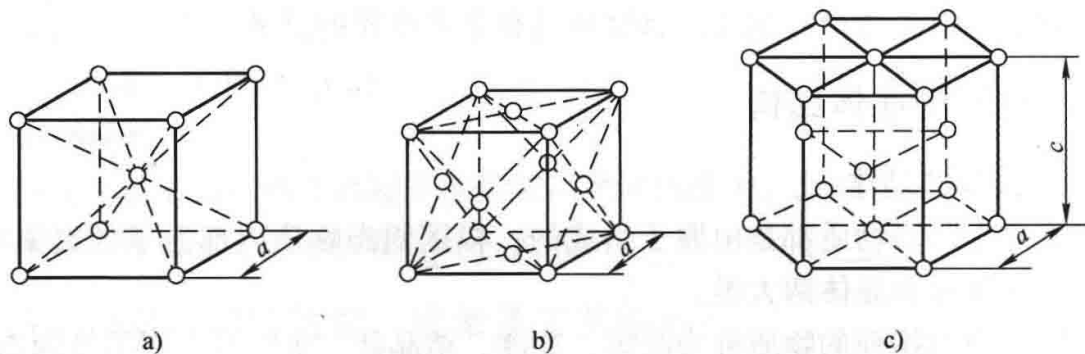
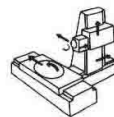


图 1-6 晶格结构示意图

a) 体心立方晶格 b) 面心立方晶格 c) 密排六方晶格

(2) 面心立方晶格 如图 1-6b 所示，面心立方晶格的晶胞也是一个正立方体，原子位于立方体六个面的中心和八个顶点，顶点上的每个原子为相邻八个晶



胞所共有，面心上的每个原子为与其相邻晶胞所共有。属于这种晶格类型的金属有铝（Al）、铜（Cu）、镍（Ni）、银（Ag）、 $\gamma$ -Fe 等。

(3) 密排六方晶格 如图 1-6c 所示，密排六方晶格的晶胞是一个正六棱柱体，原子位于两个底面的中心处和十二个顶点上，柱体内部还包含着三个原子。顶点的每个原子同时为相邻的六个晶胞所共有，上下底面中心的原子同时属于相邻的两个晶胞，而柱体中心的三个原子为该晶胞所独有。属于这类晶格的金属有镁（Mg）、锌（Zn）、铍（Be）、镉（Cd）和钛（ $\alpha$ -Ti）等。

## 1.2.2 纯金属的结晶

晶体中原子排列规律相同、晶格位向完全一致的晶体称为单晶体。实际的金属材料由许多小晶体组成。由于每个小晶体外形不规则，且呈颗粒状，称为“晶粒”。晶粒与晶粒之间的界面称为“晶界”。由许多晶粒组成的晶体称为多晶体，固态金属材料一般都是多晶体。

金属由液态转变为原子呈规则排列的固态晶体的过程称为结晶，而金属在固态下由一种晶体结构转变为另一种晶体结构的过程称为重结晶。结晶形成的组织直接影响金属的性能。

### 1. 金属结晶的冷却曲线

金属结晶形成晶体过程的温度，可用热分析法测定，即将液态金属放在坩埚中以极其缓慢的速度进行冷却，在冷却过程中观测并记录温度随时间变化的数据，并将其绘制成如图 1-7 所示的冷却曲线 *a*。

由图 1-7 可知，当液态金属冷却到  $T_0$  时，出现水平段 1—2，其对应的温度就是金属的理论结晶温度  $T_0$ ，冷却曲线上的水平段表示温度保持不变。纯金属的结晶是在恒温下进行的，这是因为金属在 1 点开始结晶时放出结晶潜热，补偿了向外界散失的热量，2 点结晶终止后，冷却曲线又连续下降。

实际生产中，金属不可能极其缓慢地由液体冷却到固体，冷却速度是相当快的，金属总是要在理论结晶温度  $T_0$  以下的某一温度  $T_1$  才能开始结晶，如图 1-7 中曲线 *b* 所示。图中， $T_1$  称为实际结晶温度， $T_0$  和  $T_1$  之差称为过冷度  $\Delta T$ ，其大小和冷却速度、金属性质及纯度有关，冷却速度越大，过冷度也越大，实际金属的结晶温度越低。

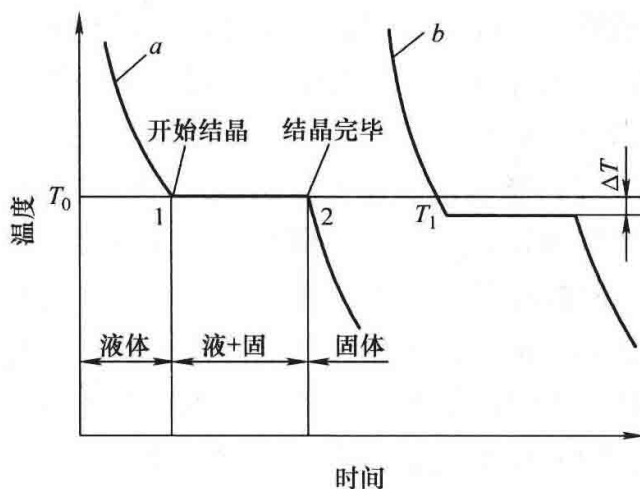


图 1-7 金属结晶的冷却曲线示意图

*a*—理论结晶温度曲线 *b*—实际结晶温度曲线



## 2. 金属结晶的规律

液态金属冷却到  $T_0$  以下时，首先在液体中某些局部微小的体积内出现原子规则排列的细微小集团，这些细微小集团是不稳定的，时聚时散，有些稳定下来成为结晶的核心，称为晶核。当温度下降到  $T_0$  时，晶核不断吸收周围液体中的金属原子逐渐长大，液态金属不断减少，新的晶核逐渐增多且长大，直到全部液体转变为固态晶体为止，一个晶核长大成为一个晶粒，最后形成的是由许多外形不规则的晶粒所组成的晶体，如图 1-8 所示。

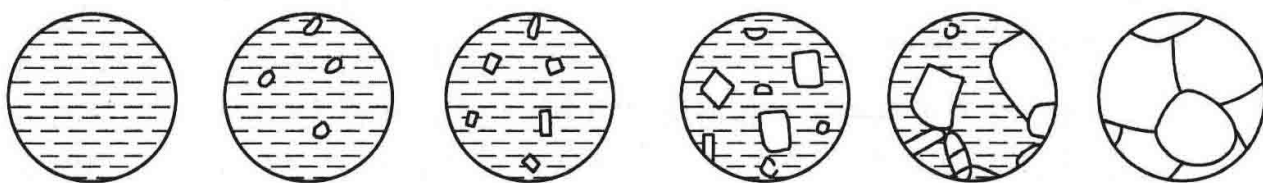


图 1-8 纯金属结晶过程示意图

(1) 金属晶核形成的方式 金属晶核形成的方式有两种，包括自发性核和非自发性核。对于理想的纯液体金属，加快其冷却速度，当温度下降到结晶温度时，将产生许多排列在一起的小原子集团，形成结晶核心，即为自发性核，是均匀形核。实际金属中往往存在异类固相质点，并且在冷却时金属总会与铸型内壁接触，因此这些已有的固体颗粒或表面被优先依附，从而形成晶核，这种方式称为非自发性核。

(2) 金属晶核的长大方式 晶核形成后，液相原子不断迁移到晶核表面而促使晶核长大成晶粒。但晶核长大程度取决于液态金属的过冷度，当过冷度很小时，晶核在长大过程中保持规则外形，直至长成晶粒并相互接触时，规则外形才被破坏。反之，则以树枝晶形态生长。这是因为随过冷度增大，具有规则外形的晶核长大时需要将较多的结晶潜热散发掉，而其棱角部位因具有最优先的散热条件，因而便得到优先生长，如树枝一样先长出枝干，再长出分枝，把晶间填满。

## 3. 金属晶粒的细化方法

金属结晶后是由许多晶粒组成的多晶体，而晶粒大小是金属组织的重要标志之一。金属内部晶粒越细小，则晶界越多，晶界面也越多，晶界就越曲折，则晶格畸变越大，从而使金属强度、硬度提高，并使变形均匀分布在许多晶粒上，塑性、韧性好。生产中常采用过冷细化、变质处理和附加振动等细化晶粒的方法。

(1) 过冷细化 这种方法是采用提高金属的冷却速度和增大过冷度  $\Delta T$  以细化晶粒的方法。如图 1-9 所示，金属结晶时，如图中实线部分所示，形核率  $N$  和晶核长大速度  $G$  都随过冷度  $\Delta T$  的增加而增加，当  $\Delta T$  增大到  $T$  时， $N$  与  $G$  均增加到最大值，过冷度  $\Delta T$  继续增大， $N$  和  $G$  随之下落，但实际液态金属的结晶很难达到如此高的过冷度，并在此之前早已结晶完毕，图中用虚线表示。因此，