

金属工艺学

北京航空学院 西北工业大学 合编



国防工业出版社

金 属 工 艺 学

北京航空学院
西北工业大学 合编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书结合航空生产的特点,较系统地叙述零件从选择原材料开始到加工成成品或半成品为止所经历各工艺环节的基础理论、工艺特点以及零件设计的结构工艺性等。另外,适当介绍了一些适合航空零件生产的先进工艺方法,并充实了金属材料及热处理的内容。书中也编入了公差与技术测量的基本原理及新的国家标准。

全书内容紧凑,可作为航空类各专业及其它类专业学生的金属材料(少学时)、公差(少学时)和金属工艺课的教材,也可作为厂办工人大学、业余大学、职工技术培训班的教材或教学参考书。还可供有关工程技术人员参考。

金属工艺学

北京航空学院 西北工业大学 合编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张16 369千字

1984年6月第一版 1984年6月第一次印刷 印数: 0,001—8,500册

统一书号: 15034·2730 定价: 2.00元

前 言

本书是由北京航空学院和西北工业大学两校继“金工实习”教材之后编写的第二本金工方面的教材。两书内容互相衔接、各有侧重。全书内容分为两篇共九章：第一篇——金属材料及热加工，包括：第一章金属材料及热处理；第二章铸造；第三章锻造；第四章焊接。第二篇——金属切削加工，包括：第五章金属切削加工的基本知识；第六章各种表面的加工方法；第七章数控加工和特种加工；第八章零件结构工艺性；第九章工艺过程的基本知识。其中第一章的内容较同类教材的内容略多、略深。这是因为：“金属材料及热处理”与“金属工艺学”两门课程的内容有十分密切的联系，两者都要求互为基础，但过去安排课程时往往是先讲授金属工艺学，后讲授金属材料学，因而造成内容重复，时间浪费。目前有些院校已改为把这两门课的教学任务集中由金属工学教研室完成，两门课的学时合并，重新安排内容顺序，这样就避免了重复。本书第一章即体现了上述特点，使之既能满足金属工艺课的要求，也能作为金属材料及热处理的基本教材（使用时只需再补充合金钢部分的内容即可）。

教材内容主要根据航空零件加工特点和需要酌情取舍，同时也兼顾非航空专业的需要，所以具有一定的普遍性。全书篇幅与同类书相比大为减少，订成一册出版，便于学生复习。

本教材适用于航空院校或其他类型学校90学时（包括金属材料及热处理课）、70学时、50学时类型的课程；也适合于航空工厂职工大学、业余大学以及技术训练班、工人技术教育的教材或教学参考书。

本书由北京航空学院高炳章、西北工业大学钱文燊分别担任正副主编；航空工业部教材编审组刘述尧担任主审。各章参加编写的人员为：绪论及第一章由高炳章编写；第二章由胡景云编写；第三章由沈荣华编写；第四章由毕惠琴编写；第五章由王荣新、薛振林编写；第六章由薛振林、张登云编写；第七章由钱文燊编写；第八章由蔡传杰编写；第九章由蔡传杰、朱恩科、梁培寿编写。在编写过程中曾得到杜春山教授和彭德一副教授的帮助，在此表示衷心的感谢！

由于编写时间仓促，调查研究不够，加上我们业务水平及教学经验不足，书中难免存在缺点和错误，诚恳希望广大读者批评指正。

编 者

绪 论

一架飞机、一台机器、一种工程结构，都是由许多金属零件组成。而每一个金属零件的获得又离不开制造工艺。金属工艺学正是一门研究金属零件制造工艺的综合性技术科学。

例如，欲使一架优良飞机的设计图纸变为现实，总是要经过制造、装配过程才能成为具体的构造。其制造过程是首先从选择加工用的原材料开始到制出零件，中间经过毛坯生产、热处理和用各种方法加工，才能成为合格的零件。然后，再将这些加工好的零件装配成部件、继而组装成整架飞机。提供毛坯件的重要加工方法是铸造和锻造；对零件加工的方法主要有切削加工、钣金加工和非金属零件制造。其中，切削加工即通过车、铣、刨、磨等工序把毛坯加工成所需之零件。焊接既可作为毛坯或零件的一种生产方法，又是重要的装配连接方法。

金属工艺学是研究上述各种加工方法本身的基础理论、工艺特点及结构工艺性；同时也研究各种加工方法之间的联系和应用范围。

在航空院校中，金属工艺学是作为一门综合性的技术基础课来安排的。在教学计划中，规定为学生的必修课程之一。开设这门课程的目的是在于使学生了解常用金属材料及各种加工方法的基础理论、基本工艺，并围绕零件结构工艺性这个问题使学生懂得在设计零件时必须了解和熟悉其制造工艺，才能设计出工艺结构性良好的零件。

金属工艺课程是在教学实习之后安排的课堂教学，是在学生对工业生产和零件加工过程有了感性认识并具有一定操作技能的基础上进一步分析、归纳生产中的问题提高到理性高度来认识。因为课程是以实践为基础，而生产过程中各种因素的影响是千变万化和极为复杂的，这就决定了本课程内容与基础课不同，其特点是名词、概念多于严格的理论推理，叙述分析多于数学计算。学生在学习中必须善于联系实习中遇到的各种实际问题，深入领会课程的内容，方能达到灵活运用和融会贯通之目的。

目 录

第一篇 金属材料及热加工	
第一章 金属材料及热处理	1
§ 1-1 金属的机械性能	1
一、强度	1
二、塑性	3
三、硬度	3
四、冲击韧性	5
五、疲劳强度	5
§ 1-2 金属的结构及结晶	6
一、金属的晶体结构	6
二、金属的晶体结构	7
三、纯金属的结晶过程	9
四、冷却曲线与过冷度	10
五、影响晶粒大小的因素及细化晶粒方法	11
六、金属在固态时的转变——同素异晶转变	11
§ 1-3 合金的结构及二元合金状态图	
简述	12
一、合金的结构及其特性	12
二、二元合金状态图	13
§ 1-4 铁-碳合金状态图	14
一、钢和铁	14
二、铁碳状态图中基本组元的性质	14
三、铁碳合金状态图分析	17
四、典型合金结晶过程	18
五、含碳量对铁碳合金组织和机械性能的影响	21
§ 1-5 碳素钢及钢的分类、编号	22
一、钢中杂质对性能的影响	22
二、钢的分类、编号	23
§ 1-6 钢的热处理	28
一、热处理在航空工业中的重要性	28
二、钢热处理的基本原理	29
三、钢的热处理工艺	39
四、钢的化学热处理	43
§ 1-7 有色金属及其合金	47
一、铝及铝合金	47
二、镁合金及其分类	53
三、钛合金及其分类	54
四、铜合金及其分类	56
第二章 铸造	58
§ 2-1 合金的铸造性能	58
一、合金的吸气性	58
二、合金的流动性	59
三、合金的收缩性	60
四、合金的偏析	62
§ 2-2 常用的铸造合金	63
一、航空上常用的铸造合金	63
二、一般常用铸造合金	67
§ 2-3 航空上常用铸造方法的工艺特点及选择	72
一、砂型铸造	72
二、熔模铸造	73
三、金属型铸造	74
四、压力铸造	75
五、低压铸造	76
六、离心铸造	76
七、定向结晶铸造	77
§ 2-4 铸件结构工艺性	78
一、铸造工艺对铸件结构的要求	78
二、合金的铸造性能对铸件结构的要求	81
三、铸造方法对铸件结构的要求	83
四、铸造工艺参数的选定	84
第三章 锻压	86
§ 3-1 概述	86
一、金属压力加工的实质及方式	86
二、金属压力加工的特点及应用	87
§ 3-2 金属塑性变形基本理论	87
一、金属塑性变形基本方式	87
二、金属的加工硬化与再结晶	87
三、冷变形与热变形	88
四、金属的纤维组织及其合理分布	90
五、金属的可锻性	90
§ 3-3 锻造方法及其工艺特点	93
一、锤锻方法及其工艺特点	93
二、压力机锻造方法及其工艺特点	98
三、模锻生产工艺过程	101
§ 3-4 模锻件设计及锻造零件的结构工艺性	102
一、模锻件设计	102
二、锻造零件的结构工艺性	105
§ 3-5 航空锻件生产特点及质量控制	108
一、航空锻件生产特点	108
二、航空锻件质量控制	109
§ 3-6 先进锻压加工	111
一、精密模锻	111
二、辊锻	112
三、挤压	112
第四章 焊接	115
§ 4-1 焊接的实质与分类	115

一、焊接的实质	115
二、焊接方法的分类	115
三、焊接方法的优缺点	115
§ 4-2 手弧焊与埋弧自动焊	117
一、焊接热源——电弧	117
二、焊缝的形成	119
三、焊接工艺	123
四、电焊条	123
五、焊接应力和变形	125
六、埋弧焊	127
§ 4-3 气体保护焊和其他熔化焊方法	127
一、氩弧焊	128
二、二氧化碳气体保护焊	129
三、等离子弧焊	130
四、电子束焊和激光焊	131
§ 4-4 电阻焊与钎焊	132
一、电阻焊	132
二、钎焊	134
§ 4-5 焊接结构设计	136
一、金属材料的选择	137
二、焊接方法的选择	140
三、焊接接头型式与结构工艺性	140
§ 4-6 焊接质量与检验	144

第二篇 金属切削加工

第五章 金属切削加工的基本知识 ··· 149

§ 5-1 切削过程及诸现象	149
一、切削过程概述	149
二、切削力	151
三、切削热	152
四、刀具磨损	154
§ 5-2 工件材料的切削加工性	155
一、概念	155
二、常用金属材料的切削加工性	156
§ 5-3 机械加工质量	161
一、互换性与加工质量的概念	161
二、圆柱面结合的公差与配合	162
三、零件表面形状和位置精度	173
四、表面光洁度	179
§ 5-4 生产率的概念	182
一、生产率	182
二、提高生产率的途径	183

第六章 各种表面的加工方法 ··· 184

§ 6-1 外圆表面的加工	184
一、外圆表面的技术要求	184
二、外圆表面的加工方法	184
三、外圆表面加工方案的选择	189

§ 6-2 内圆表面的加工

一、概述	190
二、孔的常用加工方法	191
三、孔的光整加工	195
四、孔的加工方法选择	196
§ 6-3 平面的加工	198
一、平面的技术要求	198
二、平面的加工方法	198
三、平面加工方案的选择	200
§ 6-4 螺纹的加工	201
一、车螺纹	201
二、铣螺纹	202
三、磨螺纹	202
四、滚压螺纹	203

第七章 数控加工和特种加工 ··· 204

§ 7-1 数控加工	204
一、数控机床及其分类	204
二、数控机床的工作原理	205
三、数控加工的特点及应用	208
§ 7-2 特种加工	209
一、电火花加工	209
二、电解加工	211
三、超声波加工	214
四、激光加工	216

第八章 零件结构工艺性 ··· 218

§ 8-1 零件结构工艺性的基本概念	218
§ 8-2 切削加工对零件结构设计的要求	218
§ 8-3 零件的切削加工工艺性实例分析	218

第九章 工艺过程的基本知识 ··· 226

§ 9-1 概述	226
一、生产过程和工艺过程	226
二、切削加工工艺过程及其组成	226
三、生产类型	226
§ 9-2 工件的定位和夹具	227
一、工件的定位、夹紧和安装	227
二、工件的定位原理	227
三、工件的基准	229
四、定位基准的选择	230
五、夹具	231
§ 9-3 工艺规程的制订	234
一、对零件进行工艺分析	235
二、选择毛坯	235
三、制订工艺路线的有关问题	236
§ 9-4 工艺尺寸链	238
一、尺寸链的组成	239
二、尺寸链的计算公式	239
三、工艺上常见的工艺尺寸链计算举例	241
§ 9-5 典型零件的工艺路线	244

第一篇 金属材料及热加工

第一章 金属材料及热处理

§ 1-1 金属的机械性能

用金属材料制成的机器零件和建筑构件，在使用过程中都受着不同形式外力的作用，通常把这种外力称为载荷（或负荷）。根据载荷的大小和方向是否变化，可分为静载荷和动载荷。金属零件在载荷作用下所表现出来的抵抗能力称为机械性能，包括强度、塑性、硬度、韧性和疲劳等等。因此，金属的机械性能是衡量金属质量的主要指标，也是从事设计和制造的技术人员合理选择材料的依据之一。

一、强 度

强度是指材料或构件在外力作用时抵抗破坏的能力。

为了测定金属的强度，采用广泛使用的静拉伸试验。首先把要试验的金属材料按照国标（GB228-63）规定制成拉伸标准试样（ $L_0=10d_0$ 或 $L_0=5d_0$ ）（图1-1）。将试样安装在拉伸试验机上，然后缓慢地在试样两端施加外力，使试样的工作部分受轴向拉力，引起沿轴向伸长，一直进行到拉断为止。拉伸过程中，试验机自动地记录了每一瞬间的载荷与变形，并绘出表示负荷-伸长曲线，这种曲线叫拉伸图（拉伸曲线）。

图1-2是退火低碳钢的拉伸曲线，由此曲线上可确定下列性能指标。

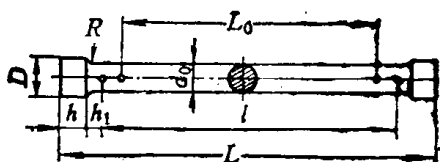


图1-1 拉伸试样的形状及尺寸

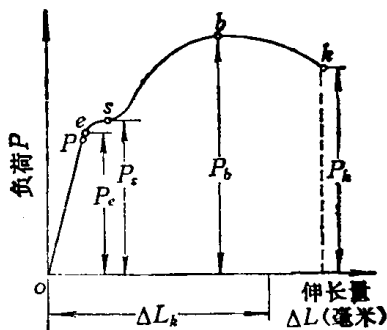


图1-2 低碳钢的拉伸图

1. 弹性变形和弹性极限(σ_e)

负荷比较小时（ P_e 前），试样伸长量与负载成正比地增加，这种变形是弹性变形，图中 Op 所示。负荷大于 P_e 后，图上曲线偏离直线，这种变形是弹塑性变形。 P_e 是开始产生微量塑性变形时的负荷，也是弹性极限的负荷。所以，弹性极限（ σ_e ）是材料从弹性变形过渡到弹塑性变形时的应力。国家标准中规定，以残余伸长量为0.01%的应力作为“规定弹性极限”，以 $\sigma_{0.01}$ 表示。故 σ_e 是代表材料开始产生微量塑性变形时的抗力。

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0} \quad \text{牛顿/毫米}^2$$

2. 屈服现象和屈服极限 (σ_s)

负荷增加到一定值时, 负荷指示器的指针停止转动或开始往回转, 拉伸图上出现了平台。在负荷不增加或略有减少情况下, 试样还继续伸长, 这种现象叫做屈服。屈服阶段的最小负荷是屈服点(s)的负荷 P_s , 屈服后金属开始产生明显的塑性变形。

屈服强度(极限) σ_s 是金属材料在外力作用下出现屈服时的应力。

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} \quad \text{牛顿/毫米}^2$$

但是, 除退火的或热轧的低碳和中碳钢等少数合金有屈服现象外, 大多数金属合金没有屈服点。因此, 规定使试样的残留伸长为试样计算部分长度的0.2%时的应力, 作为屈服强度, 以 $\sigma_{0.2}$ 表示。所以屈服强度是表征材料发生明显塑性变形时的抗力。

3. 最大负荷和抗拉强度 (σ_b)

屈服阶段以后, 对上述试样继续增加外力, 则试样更被均匀拉长, 这时的伸长完全是塑性变形。负荷达到一个最大值 P_b 后, 试样的某一部位截面开始急剧缩小, 出现了“缩颈”现象。此后的变形主要集中在缩颈附近, 由于缩颈处试样截面的急剧缩小, 致使负荷下降。因此, P_b 是试样拉断前所能承受的最大负荷。相应的应力即材料的抗拉强度(即强度极限)。

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0} \quad \text{牛顿/毫米}^2$$

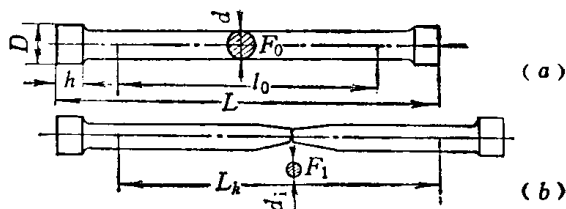


图1-3 拉断后的试样

(a) 标准试样; (b) 拉断后的试样。

抗拉强度是金属材料在拉断前所能承受的最大应力, 同时也是表征材料最大均匀变形的抗力。

负荷下降到 P_k 时, 试样断裂 (见图1-3), P_k 称断裂负荷。

4. 弹性模量(E)

材料在弹性范围内应力 (σ) 与应变 (ε) 成正比, 其比例常数 E 称为弹性模量。

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{牛顿/毫米}^2$$

工程上用弹性模量 E 作为衡量材料刚度的指标。刚度是指金属及合金在外力作用时抵抗弹性变形的能力。弹性模量愈大, 材料的刚度也愈大。

5. 比强度及比刚度

现代飞机由于速度高、所受的载荷大、工作环境复杂 (高温、低温和高压等), 所以对航空材料不仅要求强度、刚度大, 而且还要求重量轻 (比重小), 即要求它的“比强度”和“比刚度”大。所谓比强度是指航空材料的抗拉强度与它的比重之比; 比刚度是指航空材料的刚度与它的比重之比。

以比强度为例, 高强度铝合金的 $\sigma_b = 600$ 牛顿/毫米², 比重 $\gamma = 2.8$, 则其比强度为 214 牛顿/毫米²; 某高合金钢的 $\sigma_b = 1100$ 牛顿/毫米², 比重 $\gamma = 8$, 则其比强度为 138 牛顿/毫米², 比铝合金低。这就是飞机上大量采用铝合金做结构材料的原因。

二、塑 性

塑性是指金属及合金在外力作用下产生永久变形而不破坏的能力。以相对延伸率(δ)和相对断面收缩率 ψ 来衡量。

1. 延伸率

延伸率是指试样拉断后的伸长量与原始长度的百分比。

$$\delta = \frac{L_k - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 L_0 ——拉伸试样的原始计算长度(毫米);

L_k ——拉伸试样断裂后的计算长度(毫米)。

由式(1-1)可以看出,相对延伸率决定于试样的原始长度。所以,为了使不同尺寸的试样(材料相同)得到相同的伸长率,在确定相对延伸率时就必须选取原始长度 L_0 和原始断面面积 F_0 。(或者试样原始直径 d_0)之间具有一定的比例关系的试样。一般取 $L_0/\sqrt{F_0}=\text{常数}$,即试样必须按比例增大或减小其长度和截面积。为此,我国和大多数其它国家一样,选定 $L_0/\sqrt{F_0}=5.65$ 或 11.3 。对圆形试样来说相当于 $L_0/d_0=5$ 或 10 ,前者称为短试样,后者为长试样。其伸长率分别为 δ_5 和 δ_{10} 表示。应该注意的是同一塑性材料的 δ_5 和 δ_{10} 的数值是不相等的,不能直接比较。

2. 断面收缩率

断面收缩率是指试样拉断后断口截面的缩减量与原截面面积的百分比。

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

式中 F_0 ——拉伸试样原始横截面面积;

F_1 ——拉伸试样断口处横截面面积。

圆形试样 F_1 较易测定,只要将断面试样对接起来,测出它的最小直径 d_k 后即可求出 ψ 值。

三、硬 度

硬度是指金属或合金抵抗压入物压入其表面的能力。工程上常用来测定硬度的方法有布氏法和洛氏法。

(一) 布氏硬度(HB)

布氏硬度是在布氏硬度计上测量得到的。布氏硬度的测定原理是用一定大小的载荷 P (公斤力),把直径为 D (毫米)的淬火钢球压入被测金属的表面(见图1-4),保持一定时间后卸除载荷,测出金属表面压痕的表面积(毫米²),用表面积除载荷 P 所得的商值即为该种材料的硬度指标,以符号HB表示。

$$HB = \frac{P}{F} \quad \text{公斤/毫米}^2$$

式中 P ——载荷(公斤);

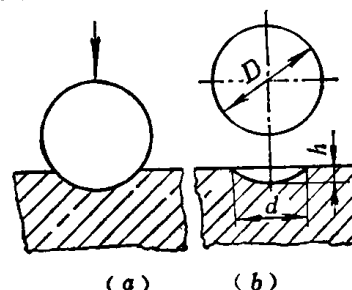


图1-4 布氏硬度试验原理示意图

(a) 加载; (b) 卸载后。

F ——压痕表面积（毫米²）。

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

布氏硬度一般不标出单位，其值愈高表示材料愈硬。

在实际使用时，由于压痕深度 h 的测量较困难，而压痕直径 d 则较易于测量，因此，将上式中的 h 换算成 d 的关系。操作时只须用带刻度的放大镜测出压痕直径然后查布氏硬度表即可得出 HB 值来。

布氏硬度机上测得的压痕面积较大，能反映较大范围内金属各组成相综合影响的平均性能，因此准确度较高。但其压头为淬火钢球，所以只能测量硬度不高（HB<450）的材料。特别适于测定灰铸铁、轴承合金及具有粗大晶粒的金属材料。

（二）洛氏硬度（HR）

洛氏硬度测量法目前应用最广。其原理是：用一个顶角为 120° 的金刚石圆锥或直径为 1.588 毫米（ $\frac{1}{16}$ 英寸）的钢球，在一定载荷下压入被测金属材料表面，去掉载荷后测量压痕的深度，以深度的大小表示材料的硬度值。

图 1-5 中 0-0 为金刚石压头没有和试样接触时的位置；1-1 为压头和试样接触并受到初载荷 P_1 （10kg）后压入深度为 h_0 的位置；2-2 为加上主载荷 P_2 后压入试样的位置；3-3 为卸去主载荷 P_2 后仍保留 P_1 时压头压入的位置。此时，压头受主载荷作用时实际压入试样的深度为 h ， h 的大小可用来衡量材料的软硬程度。为了适应人们以值越大硬度越高的习惯，规定用一常数 K 减去压痕深度 h 的值作为洛氏硬度值的指标，并规定每 0.002 毫米为一个洛氏硬度单位，则洛氏硬度值为：

$$HR = \frac{K - h}{0.002}$$

当使用金刚石压头时 $K = 0.2$ 毫米，按黑色刻度盘刻度所示。

使用钢球压头时 $K = 0.26$ 毫米，按红色表盘刻度所示。

洛氏硬度试验时，根据实验材料可能的硬度，采用不同压头与总载荷，组成几种不同的硬度标度，每一种标度用一个字母在洛氏硬度符号 HB 后加以注明。我国常用的是 HRA，HRB，HRC 三种，其规范见表 1-1。

洛氏硬度试验的优点是：操作迅速简便，压痕较小，在产品表面直接进行测量也无损于零件，故可直接用于检验零件。可测定各种金属材料的硬度，也可测定较薄工件或表面薄层的硬度。它的缺点是压痕较小，代表性差。

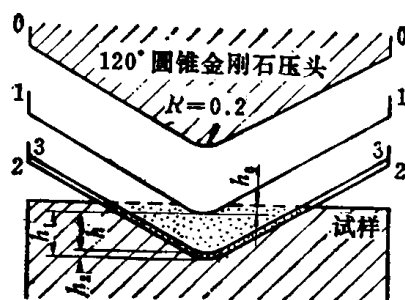


图1-5 洛氏硬度试验原理示意图

表1-1 洛氏硬度的试验规范

标度	压头类型	初载荷 (公斤力)	总载荷 (公斤力)	表盘 刻度	应用范围	说 明
HRA	120°金刚石圆锥	10	60	黑色	70~85	测量硬度较高的材料如碳化物, 硬质合金等
HRB	1.588毫米直 径钢球	10	100	红色	25~100	测量硬度较低的材料, 如退火钢、灰铸铁、 有色金属等
HRC	120°金刚石圆锥	10	150	黑色	20~67	测量硬度很高的材料, 如淬火钢、调质钢等

四、冲击韧性

冲击韧性是指金属或合金抵抗冲击载荷的能力, 其值的大小是以金属或合金在冲击力打击下破坏时单位面积上所吸收的功表示。

工程技术上常用一次摆锤冲击弯曲试验来测定金属受冲击载荷的能力。原理是: 把欲测的材料制成一定尺寸和形状的标准试样 (见图 1-6), 将制成的标准试样放在试验机的支座上 (见图 1-7), 再把冲击机上重量为 G 的摆锤升至一定高度 (H), 使获得一定的位能 (GH), 然后摆锤自由落下并冲断试样后摆锤继续升高 h , 摆锤剩余能量 Gh 。摆锤冲断试样所失去的能量 (位能) 就是冲断试样所消耗的功 (焦耳), 以 A_k 表示。

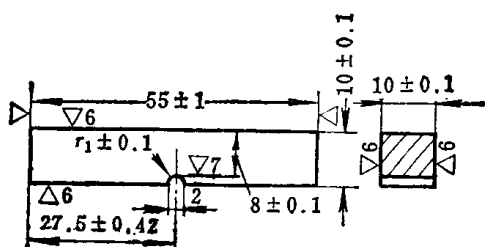


图1-6 冲击试验的标准试样

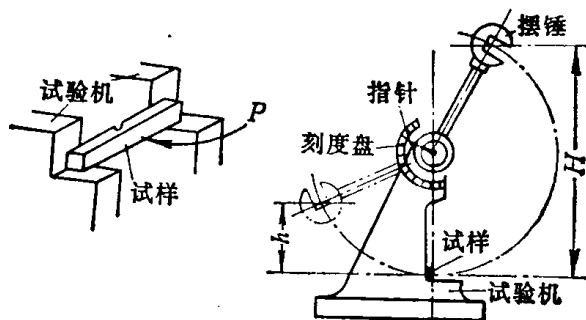


图1-7 冲击试验示意图

$$A_k = GH - Gh = G(H - h) \text{ 焦耳}$$

用试样缺口处截面积 F (厘米²) 去除, 即得到冲击韧性值 a_k :

$$a_k = \frac{A_k}{F} \text{ (焦耳/厘米}^2\text{)}$$

一次冲击试验方法简便, 能够灵敏地反映出金属材料品质、宏观缺陷和显微组织方面的微小变化, 所以在生产中应用较广泛。

五、疲劳强度

许多零件如飞机、发动机中的轴和叶片、各种齿轮、弹簧等在工作中承受的载荷不是静止不变的, 而是反复改变大小或同时改变大小和方向的“交变载荷”。虽然机件所受的应力比材料的抗拉强度小甚至比屈服强度还小, 但是在长期使用中往往会发生突然断裂, 这种破坏现象称为疲劳破坏。疲劳破坏前, 即使是塑性很好的材料也常常没有显著

的残余变形, 呈脆性断裂。其断口处呈现两个区域, 一个区域是光滑的, 另一个区域是粗糙的颗粒区 (见图 1-8)。

为了测定材料的疲劳性能, 需取一组相同材料做成的、经过抛光的标准试样。在疲劳试验机上各试样承受不同大小的交变载荷直到断裂, 然后分别测得断裂的周次 N , 并绘出疲劳曲线 (见图 1-9)。从图看出, 应力降低到一定的数值后, 疲劳曲线成为一条水平线, 即表示材料经受无限次应力循环而不发生疲劳断裂。这一应力, 即为此材料的疲劳极限或疲劳强度, σ_{-1} 表示光滑试样的对称弯曲疲劳极限。

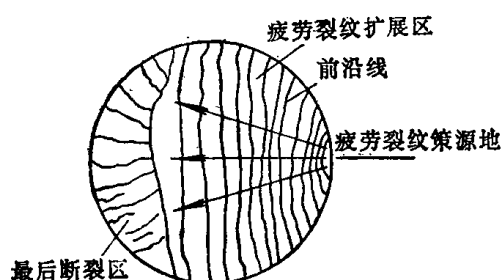


图1-8 疲劳断口示意图

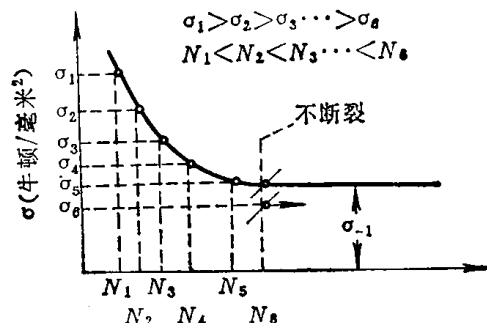


图1-9 疲劳曲线示意图

工程上用的疲劳强度, 是指材料在一定的应力循环次数下, 试样不发生断裂的最大应力。规定钢铁材料的循环周次 $N = 10^7$, 非铁金属的 $N = 10^8$ 。要提高材料的疲劳极限, 可采取改善零件结构形状, 避免应力集中, 提高零件表面光洁度和进行表面强化等措施。

§ 1-2 金属的结构及结晶

一、金属的晶体结构

世界上一切物质 (包括金属在内) 都是由原子组成。固态金属原子呈规则排列, 属于晶体范畴。规则有次序排列的晶体原子在空间做规律的、周期的重复, 称为空间晶格或空间点阵。空间晶格具有各种不同的形状, 为了简便起见, 取一单位体积作为晶格的最小组成单位, 称为晶胞。每一种晶格都是由晶胞堆砌而成。晶胞的大小和形状以晶胞的三条棱边长度 a 、 b 、 c 和棱边之间的夹角 α 、 β 、 γ 来表示 (见图 1-10)。这些参数称为晶格常数。棱边长度以 $\text{\AA}$ (埃) 作为计量单位, $1 \text{\AA} = 10^{-8}$ 厘米。

最常见的金属结构有下列三种:

(一) 体心立方晶格 (如图 1-11 所示)

其晶胞形状为立方体 $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。原子分布在立方体的各个结点及中心。属于体心立方晶格的金属有铁 ($\alpha\text{-Fe}$)、锰、铬、钒、钨、钼、钾、钠等。

(二) 面心立方晶格 (如图 1-12 所示)

其晶胞形状为立方体, 原子分布在立方体的各个结点及各面的中心处。属于这一类晶格的金属有铁 ($\gamma\text{-Fe}$)、铜、铝、镍、铅、金、银等。

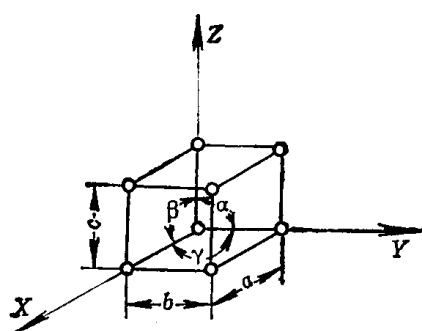


图1-10 晶胞及晶格常数表示法

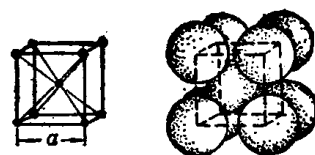


图1-11 体心立方晶格

(三) 密排六方晶格 (如图 1-13 所示)

其晶胞形状为立方柱体 $a = b \neq c$; $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$ 。原子分布在各个结点及上下两正六方面的中心, 另外在立方柱体中心还有三个原子, 此三个原子与顶面及底面原子相切。属于这一类晶格的金属有镁、锌、镭、铍等。

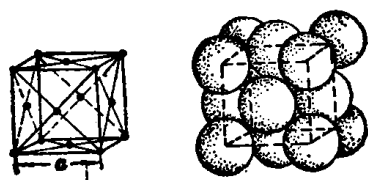


图1-12 面心六方晶格

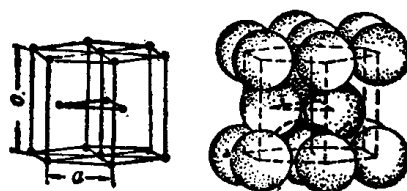


图1-13 密排六方晶格

二、金属的晶体结构

(一) 金属是多晶体

工业上使用的金属都是由许多小晶体组成的多晶体 (见图 1-14), 每个小晶体称为晶粒。晶粒是由许多位向相同的晶胞堆积而成的。不同晶粒其结晶方向不同, 所以整块金属呈现“伪各向同性”。如果一整块金属仅由一个晶粒组成, 则称单晶体。

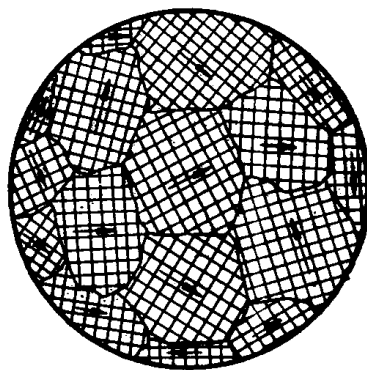


图1-14 多晶体示意图

(二) 金属的晶体缺陷

金属晶体中, 原子排列或多或少地存在偏离上述理想结构的区域, 称为晶体缺陷。这些缺陷对金属的许多性能有着极重要的影响。

根据缺陷的几何形状可分为点缺陷, 线缺陷和面缺陷三大类。

1. 点缺陷

点缺陷是指在空间长、宽、高三个尺寸方向上都很小的一种缺陷。

在晶体中，原子在其平衡位置上作高频率的热振动，振动能量也经常变化。在一定温度下，任一瞬间，晶体中总有某些原子具有很高的振动能量而离开其平衡位置，如果原子跑到晶体表面上，晶体内便留下一个空结点，称为空位（见图1-15）；如果原子跑到晶格的间隙中则形成间隙原子（见图1-15）。

晶体中的空位和间隙原子不是固定不变的，当空位周围的原子由于热振动能量的起伏，获得足够的能量时，就会跳入空位，它原来的位置上形成新的空位，即空位沿相反方向迁移了一个原子间距。同理，间隙原子也可以从这一间隙跑到另一间隙。当空位或间隙原子移至晶体表面和晶界或两者相遇时，便随之消失。空位和间隙原子的运动，是金属晶体中原子扩散的主要方式之一。如金属的固态相变过程和化学热处理过程均依赖于原子的扩散。

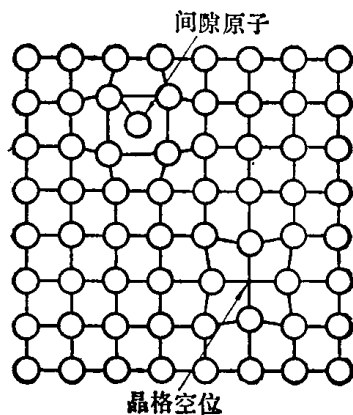


图1-15 点缺陷示意图

2. 线缺陷（位错）

线缺陷是指在晶体空间某一方向上的尺寸较长，而另外两个方向上的尺寸很短的一种缺陷。

这类缺陷主要指的是位错。即在晶体中，有一列或若干列原子，发生了有规律的错排现象。最简单的位错是刃型位错和螺型位错。

在晶体内部有一个原子平面中断排列，这个原子面中断处的边沿（ EF ）就是一条刃型位错（见图1-16）。在位错线附近的晶格发生了弹性畸变（歪扭）。晶体的上半部，位错线附近一定范围内的原子受到压应力，晶体的下半部，位错线附近原子则受到拉应力。这种晶格畸变区的半径（图中虚线圆）大约只有几个原子间距，而位错线可长达几千至几万个原子间距，相比之下，位错宽度是非常小的，所以可以认为是线状缺陷。为了研究方便，把在晶体上半部分多出半排原子面的刃型位错叫正刃型位错，用符号“ $\perp$ ”表示，晶体下半部分多出的半排原子面称为负刃型位错，用符号“ $\neg$ ”表示。

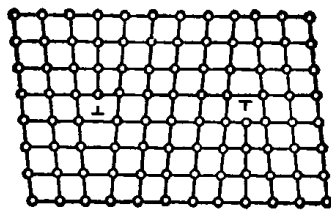
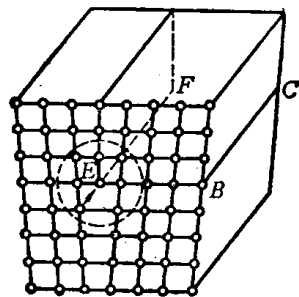


图1-16 刃型位错示意图

晶体中存在位错已被实验所证实，它对金属的性能（如强度、塑性等）有着重要的影响。

3. 面缺陷

面缺陷是指在空间两个方向上的尺寸都很大，而在第三个方向上的尺寸很小的一种

缺陷。主要是指晶粒间界（晶界）和亚晶界（嵌镶块）。

多晶体中各晶粒的取向各不相同（见图 1-17），不同取向晶粒之间的接触面称为晶界。晶界处的原子为了适应相邻晶粒的不同取向而处于一种不规则的过渡状态，一般只有 2~3 个原子厚度的薄层。

晶界与相邻晶粒之间的位向差（见图 1-17 中的 θ 角）有关，当 θ 小于 $10^\circ \sim 15^\circ$ 的晶界称为小角度晶界（见图 1-19）， θ 大于 $10^\circ \sim 15^\circ$ 的晶界称为大角度晶界（见图 1-18）。在多晶体材料中，各晶粒之间的位向差大都在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 之间，属于大角度晶界。

由于晶界上的原子排列偏离理想的晶体结构，所以比晶粒内部的能量高，因而晶界具有与晶粒不同的许多特性，主要有：

- （1）在常温下，晶界对滑移（塑性变形）起阻碍作用，即表现为晶界强度较高。
- （2）容易满足固态相变所需要的能量起伏，新相往往在旧相晶界处形核。
- （3）晶界处有较多的空位，原子沿晶界的扩散速度快。
- （4）其它还有抗腐蚀性能差、电阻较高和熔点较低等。

此外，实验证明，在实际金属的晶粒内，晶格及位向也不是完全一致的，它们是由许多位向差很小（一般在几十分到 $1^\circ \sim 2^\circ$ 之间）而且尺寸微小的小晶块组成。这些小晶块称为亚晶粒或嵌镶块。亚晶粒之间的边界称为亚晶界，具有与晶界相似的特性。

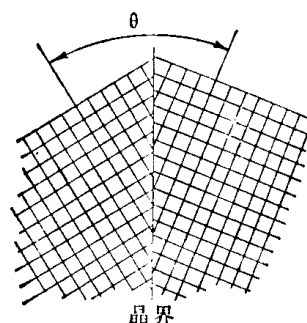


图1-17 晶粒间的位相差

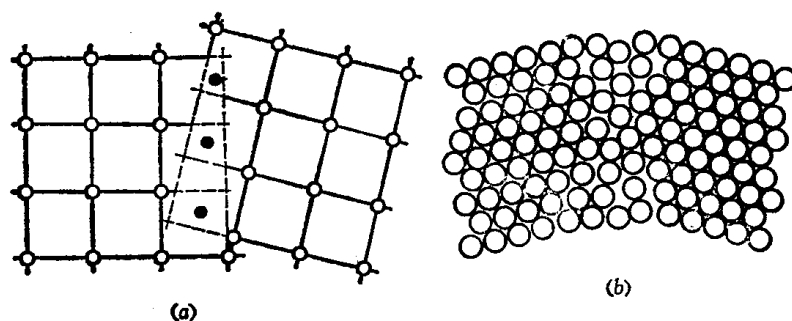


图1-18 大角度晶界原子示意图

（a）原子的折衷位置；（b）晶界的过渡结构模型。

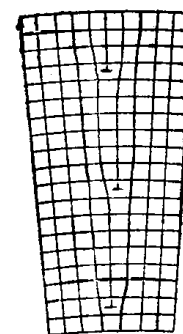


图1-19 小角度晶界

三、纯金属的结晶过程

结晶是金属由液态转变为固态晶体的过程。这一转变的关键是液态金属的冷却。

金属在液态时原子的动能较大，呈现一种紊乱的运动。随着温度的降低，原子动能逐渐减小。当金属溶液的温度降至熔点附近时，溶液中一些小的区域出现规则排列的原子集团，在一定的条件下这些小的、规则排列的原子集团成为晶核，即自发形核。随着温度的继续降低，在结晶核心的周围逐渐有原子添加上去，核心逐渐长大形成小的晶体，图 1-20 为结晶过程示意图。

当结晶开始时，已形成的许多单独的小晶体按着各自的位向自由成长着并保持有规

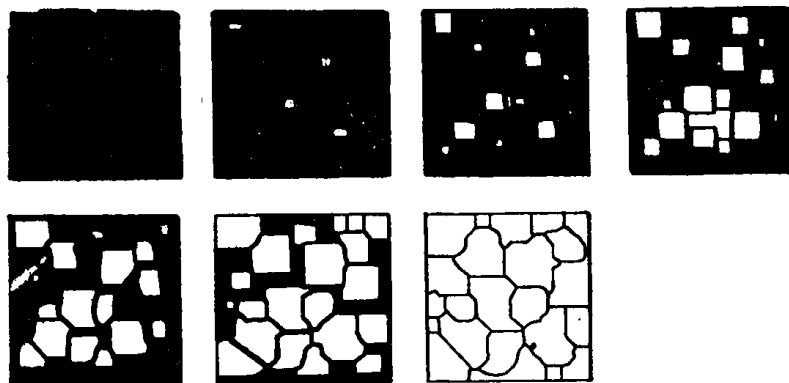


图1-20 结晶过程示意图

则的几何外形。各小晶体仅在尺寸及方位上有所不同。可是当各个晶体彼此接触后其规则的外形便遭到破坏，接触面处晶体生长被迫停止。晶体只能向着未接触的空间方向生长，直到晶体互相接触为止。所以凝固后，每一个小晶体晶粒其内部原子排列是有规律的，但晶粒与晶粒之间的交界面处（称为晶界）的原子排列是不规则的。

实际上，金属在结晶过程中晶核沿各个方向生长速度是不一样的，晶核主要是沿着生长速度最大的某几个方向发展，所以晶体实际为树枝状结晶体，称为枝晶

（见图1-21）。如果有相当多的金属填满枝晶的一切空间，那么凝固后枝晶就不显露出来。

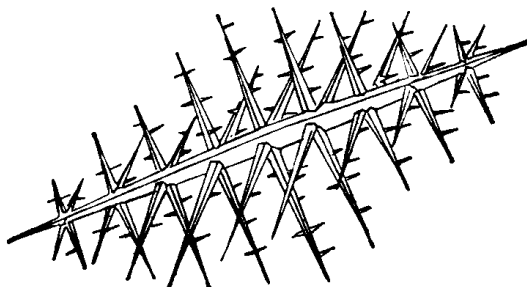


图1-21 树枝晶生长形态

四、冷却曲线与过冷度

用热分析实验法记录纯金属在缓慢冷却过程中每隔一定时间的相应温度，直到凝固完毕为止，这样就得到一系列的时间与温度的数据。将这些数据标注在以温度为纵坐标、以时间为横坐标的坐标图中，绘成温度—时间曲线（见图1-22）。由曲线可看到，

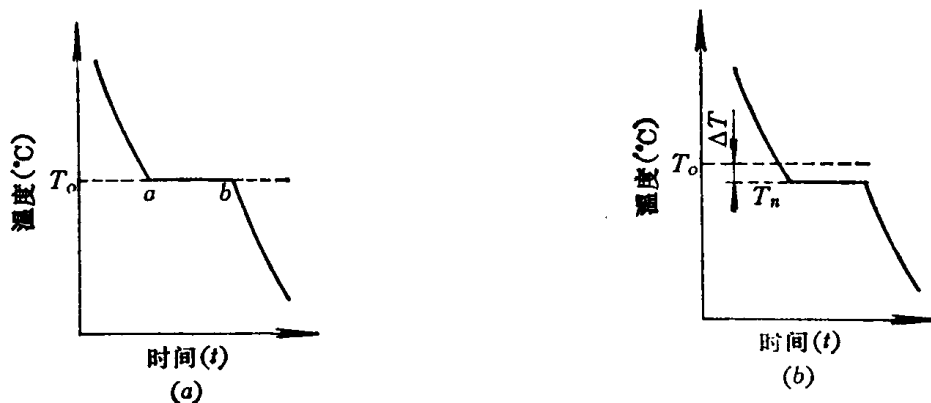


图1-22 纯金属结晶的冷却曲线