

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



JIXIE ZHIZAO JICHU

机械制造基础

孙步功 主 编

张 炜 宋月鹏 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



JIXIE ZHIZAO JICHU 机械制造基础

主 编 孙步功
副主编 张 炜 宋月鹏
编 写 黄晓鹏 杨天兴
万芳新 王振禄
杨 静 冯天涛
陈俊红
主 审 龚 俊



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

本书主要内容包括：金属材料的力学性能，金属、合金的晶体结构与结晶，铁碳合金，钢的热处理，工业用钢，铸铁，有色金属与粉末冶金材料，非金属材料，典型零件选材，铸造，压力加工，焊接与胶接，金属切削及机床基础知识，常用加工方法及切削刀具，机械加工工艺及夹具，特种加工。每个章节中均设有教学提示、教学要求、本章小结、思考与练习。本书注重对学生获取知识、分析问题与解决工程技术问题能力的培养，侧重学生工程素质与创新思维能力的提高。

本书可作为高等工科院校和高等农林院校机械类、近机类各专业的教材，也可供高职高专类工科院校及机械制造工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械制造基础/孙步功主编. —北京：中国电力出版社，
2008

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-6696-8

I. 机… II. 孙… III. 机械制造—高等学校—教材
IV. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 011040 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 4 月第一版 2008 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.5 印张 475 千字

定价 29.80 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

本书是按照高等学校机械学科本科专业规范、培养方案和课程教学大纲的要求,合理定位,由长期在教学第一线从事教学工作,富有经验的教师以科学性、先进性、系统性和实用性为目标进行编写的,能够满足不同类型和层次的教学需要。

“机械制造基础”是机械类、近机类各专业的一门技术基础课程,着重阐述常用工程材料及主要加工方法的基本原理和工艺特点,全面讲述机械零件常用材料的选用、机械零件的加工方法和工艺路线的拟订及机械制造的新技术和新工艺,兼有基础性、实用性、知识性、实践性与创新性等特点,是培养现代复合型人才的重要基础课程之一。本书的编写既体现了现代制造技术、材料科学、现代信息技术的密切交叉与融合,又体现了工程材料和制造技术的历史传承和发展趋势。在内容的选择和编写上有如下特点:

- (1) 注重实际应用,协调处理常规工艺与现代新技术的关系;
- (2) 内容系统丰富、重点突出,每章节既相互联系,又相对独立;
- (3) 考虑到机械类、近机类各专业的需要,内容的选择和安排具有一定的通用性;
- (4) 为加深理解、巩固知识,每章后附有思考与练习,供学生及时复习。

本书由孙步功编写前言、第5、6、10、11章及第12章中12.1~12.4;万芳新编写第1、2、7、9章;冯天涛编写第3章;宋月鹏编写第4章;陈俊红编写第8章;黄晓鹏编写第12章12.5;杨静编写第12章12.6;张炜编写第13、14章;杨天兴编写第15章;王振禄编写第16章。本书由孙步功主编,张炜、宋月鹏副主编。

本书由兰州理工大学龚俊教授主审,龚教授对书稿的编写提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

在全书的编写过程中,许多教师给予了大力支持,谨在此表示感谢。

由于编者水平所限,时间仓促,书中不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编者

2007年12月

目 录

前言

第1章 金属材料的力学性能	1
1.1 强度与塑性	1
1.2 硬度	4
1.3 冲击韧性	7
1.4 疲劳强度	8
本章小结	9
思考与练习	10
第2章 金属、合金的晶体结构与结晶	11
2.1 晶体结构	11
2.2 纯金属结晶	15
2.3 合金结晶与状态图	18
本章小结	23
思考与练习	23
第3章 铁碳合金	24
3.1 铁碳合金的基本组织	24
3.2 Fe-Fe ₃ C 状态图	25
3.3 典型铁碳合金的结晶度及其组织	31
本章小结	32
思考与练习	33
第4章 钢的热处理	34
4.1 钢在加热时的组织转变	34
4.2 钢在冷却时的组织转变	38
4.3 常用的退火、正火、淬火和回火工艺	45
4.4 钢的表面淬火与化学热处理	53
本章小结	56
思考与练习	56
第5章 工业用钢	58
5.1 钢的综述	58
5.2 结构钢	65
5.3 工具钢	77
5.4 特殊性能钢	83
本章小结	86
思考与练习	86

第 6 章 铸铁	87
6.1 铸铁的石墨化	87
6.2 灰铸铁	89
6.3 球墨铸铁	91
6.4 可锻铸铁	94
6.5 蠕墨铸铁	95
本章小结	96
思考与练习	96
第 7 章 有色金属与粉末冶金材料	97
7.1 铝合金	97
7.2 铜合金	102
7.3 滑动轴承合金	106
7.4 粉末冶金	108
本章小结	110
思考与练习	110
第 8 章 非金属材料	111
8.1 高分子材料	111
8.2 陶瓷材料	119
8.3 复合材料	122
本章小结	124
思考与练习	124
第 9 章 典型零件选材	125
9.1 零件的失效	125
9.2 零件的选材原则	128
9.3 典型零件选材实例分析	132
本章小结	137
思考与练习	137
第 10 章 铸造	139
10.1 合金的铸造性能	139
10.2 砂型铸造	147
10.3 砂型铸造工艺	150
10.4 铸件的结构工艺性	156
10.5 铸造毛坯的选用	163
10.6 特种铸造简介	166
本章小结	172
思考与练习	172
第 11 章 压力加工	173
11.1 金属的塑性变形	173
11.2 锻造工艺基础	177

11.3	合金的锻造性能	178
11.4	锻造工艺设计基础	180
11.5	锻件的结构工艺性	189
11.6	板料冷冲压	191
11.7	特种锻造简介	198
	本章小结	203
	思考与练习	203
第 12 章	焊接与胶接	204
12.1	熔化焊工艺基础	204
12.2	焊接接头及金属焊接性能	209
12.3	焊接应力与焊件的结构工艺性	211
12.4	熔化焊工艺设计基础	213
12.5	其他焊接方法简介	217
12.6	胶接技术	220
	本章小结	222
	思考与练习	222
第 13 章	金属切削及机床基础知识	223
13.1	切削运动与切削要素	223
13.2	金属切削过程	226
13.3	金属切削机床	231
	本章小结	235
	思考与练习	236
第 14 章	常用加工方法及切削刀具	237
14.1	车削加工及其刀具	237
14.2	钻削加工及其刀具	245
14.3	铣削加工及其刀具	251
14.4	刨削、插削加工及其刀具	256
14.5	磨削加工及其刀具	258
14.6	镗削加工及其刀具	267
14.7	拉削加工及其刀具	271
	本章小结	274
	思考与练习	274
第 15 章	机械加工工艺及夹具	276
15.1	加工工艺的基础知识	276
15.2	零件结构的工艺性要求	284
15.3	定位基准的选择	287
15.4	夹具简介	289
	本章小结	292
	思考与练习	292

第 16 章 特种加工	293
16.1 电火花加工	293
16.2 超声加工	295
16.3 激光加工	296
16.4 电化学加工	298
16.5 其他特种加工	300
本章小结	303
思考与练习	303
参考文献	304

第1章 金属材料的力学性能

教学提示：本章的任务是学习常用力学性能的定义、测定原理与方法、使用范围等。

教学要求：本章要求通过学习能较深入地了解强度、塑性、硬度、韧性的概念及其意义，并具备一定的分析和运用能力，初步了解疲劳的概念。

在实际生产中，不同的材料有不同的性能和用途。同一种金属材料通过不同的热处理方法，也可以得到不同的性能。因此，为了合理地使用各种金属材料，对其性能的了解是十分必要的。金属材料的性能包括力学性能、物理性能、化学性能和工艺性能。机械零件常以力学性能作为设计和选材的依据。金属材料的力学性能是指材料在力作用下所显示的性能（又指材料在力作用下所显示的与弹性和非弹性反应相关的或涉及应力—应变关系的性能），主要有强度、塑性、硬度、韧性和疲劳强度。

1.1 强度与塑性

若载荷的大小不变或变动很缓慢，则这样的载荷称为静载荷。金属材料的强度、塑性是在静载荷作用下测定的。

1.1.1 强度

强度是指材料在外力作用下抵抗塑性变形（永久变形）和断裂的能力。金属材料抵抗塑性变形和断裂的能力越强，其强度越高。常用的强度指标是屈服强度和抗拉强度。

强度是通过拉伸试验测定的。拉伸试验是在万能材料试验机上用静拉伸力对标准试样进行轴向拉伸，测量拉伸力和相应的伸长，并测其力学性能的试验。拉伸时一般将拉伸试样拉至断裂。

1. 拉伸试样

试验通常采用圆柱形拉伸试样，试样尺寸按国家标准制作。试样分为短试样（ $L_0 = 5d_0$ ）和长试样（ $L_0 = 10d_0$ ）两种。拉伸试样见图1-1， d_0 为标准试样的原始直径， L_0 为标准试样的原始标距长度， d_1 为试样断口处的直径， L_1 为拉断试样对接后测出的标距长度。 L_0 和 d_0 有规定的标准值，一般 L_0 为100mm或50mm。

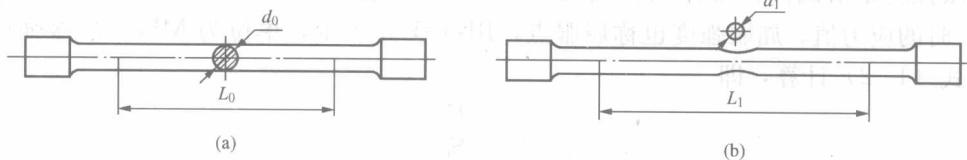


图1-1 拉伸试样

(a) 拉伸前；(b) 拉伸后

2. 拉伸曲线

试验时，将标准试样装在拉伸试验机的上下夹头上，开动拉伸试验机，缓慢加载拉伸，

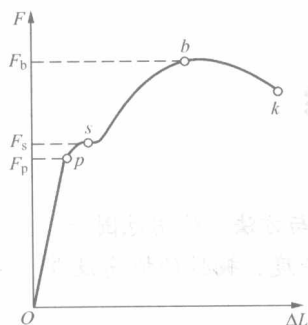


图 1-2 退火低碳钢的
拉伸曲线

随载荷增加, 试样逐渐伸长直至拉断。同时, 记录装置记录下拉伸过程中的力—伸长量 ($F-\Delta L$) 曲线, 即拉伸曲线。图 1-2 所示为退火低碳钢的拉伸曲线。

由拉伸曲线可知, $F=0$ 时 $\Delta L=0$, 在载荷增大到 F_p 的过程中, 试样的伸长量 ΔL 与拉伸力 F 之间成正比例关系, 在拉伸曲线图 (见图 1-2) 中表现为斜直线 Op 。在此范围内卸除载荷, 试样能完全恢复到原来的形状与尺寸, 符合虎克定律, 即试样处于弹性变形阶段。图 1-2 中, F_p 是试样保持弹性变形的最大拉伸力。

当载荷不断增加, 超过 F_p 时, 试样将产生塑性变形, 卸载后变形不能完全恢复, 塑性伸长将被保留下来。当载荷继续增加到 F_s 时, 拉伸曲线在 p 点后出现水平或锯齿形线段, 表示在载荷不再增加的情况下, 试样也会继续伸长。这种现象称为“屈服”, F_s 称为屈服拉伸力。

当载荷超过屈服拉伸力 F_s 后, 试样抵抗变形的能力将会增强, 此现象称为冷变形强化, 即抗力增加现象。在拉伸曲线上表现为一段上升曲线, 随着塑性变形量的增大, 试样变形抗力也逐渐增大, 即试样处于冷变形强化阶段。

当载荷增至最大值 F_b 时, 试样伸长且迅速增大而截面迅速减小, 形成“缩颈”现象。由于缩颈处截面的急剧缩小, 单位面积承载大大增加, 最后到 k 点试样被拉断, 即试样处于缩颈与断裂阶段。 F_b 是试样拉断前能承受的最大拉伸力, 称为极限拉伸力。

1.1.2 强度指标

金属材料受外力作用时, 其内部产生与外力相抗衡的内部抗力, 这种内部抗力称为内力, 单位面积上的内力称为应力, 用 σ 表示。金属的强度指标就是用应力来度量的。常用的强度指标有屈服强度与抗拉强度。

1. 弹性极限

弹性极限是指试样产生完全弹性变形时所能承受的最大拉应力, 用 σ_e 表示, 有

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (1-1)$$

式中 F_e ——试样产生完全弹性变形时所承受的最大拉伸力, N;

S_0 ——试样原始横截面积, mm^2 。

2. 屈服强度

屈服强度是指试样在拉伸试验过程中力不增加 (保持恒定), 而试样仍然能继续伸长 (变形) 时的应力值。屈服强度也称屈服点, 用符号 σ_s 表示, 单位为 MPa。屈服强度 σ_s 的值可用式 (1-2) 计算, 即

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0} \quad (1-2)$$

式中 F_s ——试样产生屈服现象时的最小拉伸力, N;

S_0 ——试样原始横截面积, mm^2 。

工业上使用的一些金属材料, 如高碳钢、铸铁等, 在进行拉伸试验时屈服现象不明显也不会产生缩颈现象, 测定很困难, 因此规定一个相当于屈服强度的强度指标。国家标准规定

此类材料以产生 0.2% 塑性变形量时的应力值为屈服强度, 用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

金属零件和结构在工作中一般是不允许产生塑性变形的。所以设计零件、结构时屈服强度 σ_s 是重要的设计依据, 也是工程技术上极为重要的力学性能指标之一。

3. 抗拉强度

抗拉强度是指试样断裂前能承受的最大应力值, 用符号 σ_b 表示, 单位为 MPa。 σ_b 可用式 (1-3) 计算, 即

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0} \quad (1-3)$$

式中 F_b ——试样断裂前能承受的最大拉伸力, N;

S_0 ——试样原始横截面积, mm^2 。

σ_b 是金属由均匀塑性变形向局部集中塑性变形过渡的临界值, 也是金属在静拉伸条件下的最大承载能力。对于塑性金属来说, 拉伸试样在承受最大拉应力之前, 变形是均匀一致的。但超过 σ_b 后, 金属开始出现缩颈现象, 即产生集中变形。

抗拉强度表示材料抵抗塑性变形和断裂的最大能力, 测试数据较准确。因此, 有关手册和资料提供的设计、选材的强度指标往往是抗拉强度 σ_b 。

1.1.3 塑性

金属材料在外力作用下发生塑性变形而不破坏的能力称为塑性。金属材料的塑性也是通过拉伸试验来测定的。金属的塑性指标用拉伸试样断裂时的最大相对变形量来表示, 常用断后伸长率和断面收缩率来表示。

1. 断后伸长率

拉伸试样在进行拉伸试验时, 在力的作用下产生塑性变形, 原始试样中的标距会不断伸长。试样拉断后的标距伸长量与原始标距的百分比称为断后伸长率, 用符号 δ 表示。 δ 值可用式 (1-4) 计算, 即

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 L_0 ——试样原始标距长度, mm;

L_1 ——试样拉断时的标距长度, mm。

试样分为长试样和短试样。使用长试样测定的断后伸长率用符号 δ_{10} 表示, 通常写成 δ ; 使用短试样测定的断后伸长率用符号 δ_5 表示。同一种材料的断后伸长率 δ_{10} 和 δ_5 数值是不相等的, 一般短试样 δ_5 都大于长试样 δ_{10} 。不同材料进行比较时, 必须是相同标准试样测定的数值才有意义。

2. 断面收缩率

断面收缩率是指试样拉断后横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比。断面收缩率用符号 ψ 表示。 ψ 值可用式 (1-5) 计算, 即

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 S_0 ——试样原始横截面积, mm^2 ;

S_1 ——试样断口处的横截面积, mm^2 。

断后伸长率和断面收缩率的数值大, 表示金属材料的塑性变形能力强, 塑性好。金属制品进行压力加工, 应选择 δ 与 ψ 值大的金属材料。机械零件工作时突然超载, 如果材料塑性

好,就能先产生塑性变形而不至于突然断裂。所以,对于大多数机械零件,除了要满足强度要求外,还必须有一定的塑性要求。但是,对于铸铁、陶瓷等脆性材料,因其塑性极低,受拉伸时几乎不产生明显的塑性变形,一旦超载便会突然断裂,使用时必须加以注意。

1.2 硬 度

金属材料抵抗更硬物体压入其表面的能力称为硬度。硬度是衡量材料软硬程度的依据,它表征材料抵抗表面局部弹性变形、塑性变形及破坏的能力。材料的硬度越高,耐磨性越好。

硬度试验和拉伸试验都是在静态力下测定材料力学性能的方法。硬度测定的设备简单,操作方便,试验中基本不会损伤工件。而且不需要制作专门的试样,可以直接在工件上进行测试,因而,被广泛应用于检验原材料和热处理件的质量,以及鉴定热处理工艺的合理性。硬度是一项综合力学性能指标,从金属表面的局部压痕即可反映出材料的强度和塑性,因此在零件图上常常标注各种硬度指标作为技术要求。

常用硬度测定方法有压入法、划痕法、回弹高度法等,其中压入法的应用最为普遍。压入法是在规定的静态试验力作用下,将压头压入金属材料表面层,然后根据压痕的面积大小或深度测定其硬度值。目前,多用压入法测定材料硬度,常用的测试方法有布氏硬度(HB)、洛氏硬度(HR)和维氏硬度(HV)试验法。

1.2.1 布氏硬度

布氏硬度的试验原理如图 1-3 所示。用一定直径的淬火钢球或硬质合金球,以规定的试验力 F 压入试样表面,经规定的保持时间后,去除试验力,测量试样表面的压痕直径 d ,然后根据压痕直径 d 计算其硬度值。

布氏硬度值是指压痕球面积上所产生的平均抗力。选择淬火钢球压头时,用符号 HBS 表示;选择硬质合金球压头时,用符号

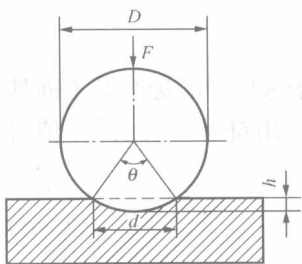


图 1-3 布氏硬度试验原理

HBW 表示。布氏硬度值可用式 (1-6) 计算,即

$$\text{HBS(HBW)} = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-6)$$

式中 D ——压头直径, mm;

F ——试验力, N;

d ——压痕平均直径, mm。

式 (1-6) 中只有 d 是变化的,因此试验时只要测量出压痕直径,就可通过计算或查布氏硬度表得出 HBS (HBW) 值。布氏硬度计算值一般都不标出单位,只写明硬度的数值。

由于金属材料有硬有软,被测工件有厚有薄,有大有小,因此,如果只采用一种标准的试验力 F 和压头直径 D ,就会出现对某些材料和工件不适应的现象。GB 231—1984《金属布氏硬度试验方法》中规定了几种 F 和 D 的选配关系,见表 1-1。在进行布氏硬度试验时,压头直径 D 、试验力 F 和保持时间应根据被测金属种类及厚度正确地进行选择。

表 1-1 布氏硬度试验规范

金属种类	布氏硬度值范围 HBS(HBW)	试样厚度/mm	$0.102F/D^2$	压头直径 D /mm	试验力/kN(kgf)	试验力保持 时间/s
黑色金属	140~150	6~3	30	10.0	29.42 (3000)	12
		4~2		5.0	7.355 (750)	
		<2		2.5	1.839 (187.5)	
有色金属	<140	>6	10	10.0	9.807 (1000)	12
		6~3		5.0	2.452 (250)	
		<2		2.5	1.839 (187.5)	
	>130	6~3	30	10.0	29.42 (3000)	30
		4~2		5.0	7.355 (750)	
		<2		2.5	1.839 (187.5)	
	36~130	9~3	10	10.0	9.807 (1000)	30
		6~3		5.0	2.452 (250)	
	8~35	>6	2.5	10.0	2.452 (250)	60

布氏硬度的标注方法是：测定的硬度值应标注在硬度符号的前面，在硬度符号的后面用相应的数字注明压头直径、试验力大小和试验力保持时间。在钢球直径 D 为 10mm，试验力为 29.42kN (3000kgf)，保持时间为 10~15s 的试验条件下，试验条件可以不标明。例如，150HBS10/1000/30，表示用直径为 10mm 的淬火钢球，在 9.807kN (1000kgf) 试验力作用下，保持 30s 测得的布氏硬度值为 150；500HBW5/750，表示用直径为 5mm 的硬质合金球，在 7.355kN (750kgf) 试验力作用下，保持 10~15s 测得的布氏硬度值为 500。

由于布氏硬度测定的压痕面积较大，可不受金属内部组成相的细微不均匀性的影响，测得的硬度值比较准确，数据重复性强。一般材料布氏硬度值小于 450 时选用淬火钢球压头，布氏硬度值在 450~650 时选用硬质合金压头。目前，我国布氏硬度试验常用的压头主要是淬火钢球。由于布氏硬度压痕大，对金属表面的损伤也较大，对于硬度高的材料、薄壁工件和表面要求高的工件，都不宜用布氏硬度测试。

1.2.2 洛氏硬度

洛氏硬度也是用压入法测定的，如图 1-4 所示，其试验原理是以锥角为 120° 的金刚石圆锥体或直径为 1.588mm 的淬火钢球作压头压入试样表面，先加初试验力 F_1 (98N)，再加主试验力 F_2 ，压入试样表面后去除主试验力，在保留初试验力的情况下，根据试样压痕深度来衡量金属的硬度大小。

图 1-4 中 0-0 位置为金刚石压头还没有和试样接触时的原始位置；1-1 为加上初试验力 F_1 后压入试样的位置；2-2 为压头受到总试验力 F 后压入试样的位置；经规定的保持时间，卸除主试验力 F_2 ，仍保留初试验力 F_1 ，试样弹性变形的恢复使压头上升至 3-3 位置，此时压头受主试验力作用压入的深度为 e ，金属越硬， e 值越小。为适应人们习惯上数值越大硬度越高的观念，因此人为地规定一个常数 K 减去压痕深度 e 作为洛氏硬度指标，并规定每一个洛氏硬度试验单位为 0.002mm。洛氏硬度值为

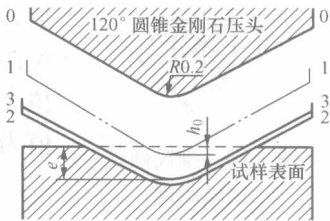


图 1-4 洛氏硬度试验原理

$$\text{HRA}(\text{HRB}, \text{HRC}) = \frac{K - e}{0.002}$$

(1 - 7)

式中 e ——压痕深度，mm。

使用金刚石圆锥体压头时常数 K 为 0.2，使用淬火钢球压头时，常数 K 为 0.26。

由压痕深度可直接得出数值，所以可从洛氏硬度计表盘上直接读出硬度值，不用计算。

洛氏硬度根据试验时选用的压头类型和试验力大小的不同分别采用不同的标尺进行标注。常采用的标尺有 A、B、C，试验条件及应用范围见表 1-2。根据 GB 230—1991 规定，硬度数值写在符号的前面，HR 后面写使用的标尺，如 52HRC 表示用 C 标尺测定的洛氏硬度值为 52。

表 1-2 洛氏硬度试验条件及应用范围

硬度符号	压头类型	总试验力 $F/\text{N}(\text{kgf})$	硬度值有效范围	应用举例
HRA	120°金刚石圆锥体	588.4 (60)	60~88	碳化物、硬质合金、淬火工具钢、浅层表面硬化钢等
HRB	φ1.588mm 淬火钢球	980.7 (100)	25~100	软钢、铜合金、铝合金、可锻铸铁
HRC	120°金刚石圆锥体	1474.1 (150)	20~70	淬火钢、调质钢、深层表面硬化钢

注 HRA、HRC 所用刻度为 100；HRB 为 130。

洛氏硬度测定操作简便，可直接读数，测量范围大，压痕小，对试样表面损伤小。因此，可广泛应用于各种材料的不同工件以及薄、小和表面要求高的工件测定。由于压痕小，对内部组织和性能不均匀的材料，测量结果可能不够准确、典型，所以在测试洛氏硬度时通常都选取不同位置的三点测出硬度值，再计算平均值作为被测金属的硬度值。

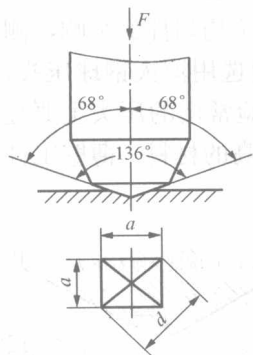


图 1-5 维氏硬度试验原理

1.2.3 维氏硬度

维氏硬度的测定原理与布氏硬度基本相似，也是根据压痕单位面积承受的压力大小来测量的。如图 1-5 所示，将夹角为 136°的正四棱锥体金刚石压头，以选定的试验力压入试样表面，经规定保持时间后，去除试验力，在试样表面上压出一个正四棱锥形的压痕，测量压痕两对角线的平均长度，计算硬度值。维氏硬度用正四棱锥形压痕单位表面积上承受的平均压力表示硬度值，用符号 HV 表示。维氏硬度值为

$$\text{HV} = 0.102 \frac{F}{S} = 0.189 \frac{F}{d^2}$$

(1 - 8)

式中 F ——试验力，N；

d ——压痕两条对角线长度的算术平均值，mm。

试验时，用测微计测出压痕的对角线长度，计算出两对角线长度的算术平均值后，查表可得维氏硬度值。

维氏硬度的标注方法与布氏硬度相同，硬度数值写在符号 HV 的前面，试验条件写在 HV 的后面。对于钢及铸铁，当试验力保持时间为 10~15s 时，可以不标出。例如，600HV30，表示用 30kgf 试验力保持 10~15s 测定的维氏硬度值为 600；640HV30/20，表示用 30kgf 试验力保持 20s 测定的维氏硬度值为 640。

维氏硬度可测软、硬金属，特别是极薄零件和渗碳层、渗氮层的硬度，其测得的数值较准确，并且不存在布氏硬度试验中载荷与压头直径比例关系的约束。此外，维氏硬度也不存在洛氏硬度中不同标尺的硬度无法统一的问题，而且与洛氏硬度相比，能更好地测定薄件或薄层的硬度。维氏硬度的缺点是其硬度的测定较为麻烦，工作效率不如洛氏硬度，不适合大批量生产的常规检验。

1.3 冲击韧性

机械零部件在工作过程中不仅受到静载荷和变动载荷的作用，还会受到不同程度冲击载荷的作用，如锻锤的锤杆、冲床的冲头、内燃机的活塞销与连杆等。冲击载荷的速度高，作用时间短，易引起材料的局部变形和断裂。因此，对于在冲击载荷条件下工作的机器零件，进行选材或设计时，必须考虑其冲击韧性。评定材料的冲击韧性，应用最普遍的试验方法是夏比冲击试验。

1.3.1 夏比冲击试验

夏比冲击试验是在摆锤式冲击试验机上进行的，试验原理如图 1-6 所示。

试验时，将带有缺口的试样放在试验机的机架上，使其缺口位于两个固定支座中间，并背向摆锤的冲击方向。将一定质量的摆锤升高到 h_1 ，使摆锤具有一定的势能 A_{KV1} (V 形缺口试样)，再使其自由落下，将试样冲断后，摆锤继续升高到 h_2 。此时摆锤的剩余势能为 A_{KV2} 。摆锤冲断试样所失去的势能 A_{KV} (J) 为

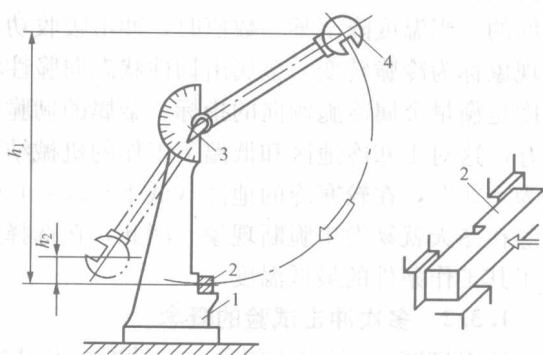


图 1-6 夏比冲击试验原理

1—固定底座；2—带缺口的试样；3—指针；4—摆锤

$$A_{KV} = A_{KV1} - A_{KV2} \quad (1-9)$$

A_{KV} 就是规定形状和尺寸的试样在冲击试验力一次作用下折断时所吸收的功，称为冲击吸收功。 A_{KV} 可以从试验机的刻度盘上直接读出。用试样的断口处截面积 $S(\text{cm}^2)$ 去除 $A_{KV}(\text{J})$ ，便得到冲击韧度，用 α_{KV} 表示，单位为 J/cm^2 ，即

$$\alpha_{KV} = \frac{A_{KV}}{S} \quad (1-10)$$

为使试验结果不受其他因素影响，冲击试样要根据国家标准制作（见图 1-7）。带 V 形缺口的试样，称为夏比 V 形缺口试样；带 U 形缺口的试样，称为夏比 U 形缺口试样。使用 U 形缺口试样进行冲击试验时，相应的冲击吸收功用符号 A_{KU} 表示，冲击韧度用 α_{KU} 表示。

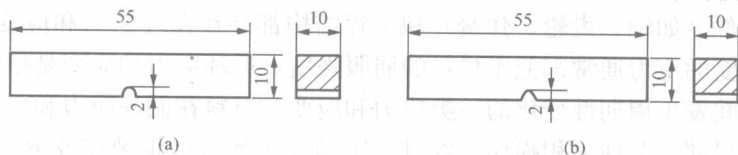


图 1-7 标准冲击试样

(a) U 形缺口；(b) V 形缺口

对一般钢材来说, 所测冲击吸收功 A_{KV} 越大, 表示金属抵抗冲击试验力而不破坏的能力越强, 材料的韧性越好。长期实践证明, A_{KV} 和 α_{KV} 对组织缺陷非常敏感, 能够灵敏地反映出材料品质、宏观缺陷和显微组织方面的微小变化。因而, 冲击试验是生产上用来检验冶炼和热加工质量的有效方法之一。

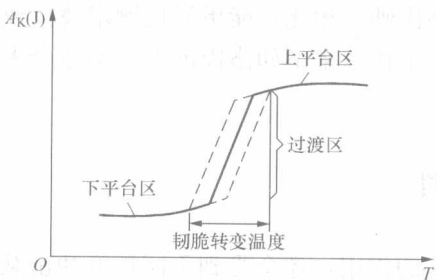


图 1-8 冲击吸收功—温度曲线

冲击吸收功与试验温度有关, 有些金属在室温试验时并不显示脆性, 而在较低温度下则可能发生脆断, 这种现象称为冷脆现象。为了确定材料由塑性状态向脆性状态变化的规律, 可分别在一系列不同温度下进行冲击试验, 进而测出金属的脆化趋势和韧脆转变温度。冲击吸收功与温度之间的关系曲线如图 1-8 所示。

对于具有低温脆性的金属, 曲线上具有上平台区、过渡区和下平台区三部分。在进行不同温度的一系列冲击试验时, 随试验温度的降低, 冲击吸收功总的变化趋势是随温度降低而降低的。当温度降至某一数值时, 冲击吸收功急剧下降, 金属由韧性断裂变为脆性断裂, 这种现象称为冷脆转变。金属由韧性状态向脆性状态转变的温度称为韧脆转变温度。韧脆转变温度是衡量金属冷脆倾向的指标。金属的韧脆转变温度越低, 说明金属的低温抗冲击性能就越好, 这对于寒冷地区和低温下工作的机械结构尤为重要。例如, 非合金钢的韧脆转变温度约为 -20°C , 在较寒冷的地区 (低于 -20°C) 使用的非合金钢构件, 如车辆、桥梁、运输管道等在冬天就易发生脆断现象。因此, 在选择金属材料时, 应要求金属的韧脆转变温度必须高于其工作条件的最低温度。

1.3.2 多次冲击试验的概念

冲击韧度 α_{KV} 是在大能量一次冲断标准试样时所得到的数据。实际上, 许多承受冲击的零件, 如锤杆、活塞杆等, 在设计和选择时过分强调 α_{KV} 值, 往往导致材料强度水准的降低, 不仅使零件粗大笨重, 浪费材料, 而且经实践证明, 零件的使用寿命也会缩短。这些受冲击的零件经过一次冲击便发生断裂的情况极少, 一般在很多次 ($>10^3$) 冲击后才会断裂, 而且所承受的冲击能量也远小于一次冲断的能量, 所以把这种冲击称为小能量多次冲击, 简称多次冲击。

金属在多次冲击下的破坏过程是由裂纹产生、裂纹扩张和瞬时断裂三个阶段组成的, 是每次冲击损伤累积和发展的结果, 它与一次冲击的损坏过程有本质的不同。因而, 用 α_{KV} 值衡量抗冲击能力是不合适的, 应进行小能量多次冲击试验测定其多次冲击抗力。

1.4 疲劳强度

许多机械零件 (如轴、齿轮、弹簧) 和工程结构都是在循环应力和应变作用下工作的, 它们工作时所承受的应力通常都低于材料的屈服强度。循环应力和应变是指应力和应变的大小、方向都随时间发生周期性变化的一类应力和应变。材料在循环应力和应变的作用下, 在一处或几处产生局部永久性累积损伤, 经过一定循环次数后产生裂纹或突然发生完全断裂, 这种现象称为材料的疲劳。

疲劳失效与静载荷下的失效不同。疲劳断裂前都不产生明显的塑性变形, 断裂是突然发

生的,因此具有很大的危险性,常常造成严重的事故。据统计,80%以上的损坏零件都是因金属疲劳造成的。因此,疲劳现象对于正确使用材料,进行合理设计具有重要意义。

工程中规定,无裂纹材料的疲劳性能判据有疲劳强度(疲劳极限)、疲劳缺口敏感度等。材料在指定循环基数下不产生疲劳断裂所能承受的最大应力称为疲劳强度。在交变载荷作用下,金属材料承受的交变应力(σ)和断裂时应力循环次数(N)之间的关系,通常用疲劳曲线来描述(见图1-9)。金属材料承受的最大交变应力 σ 越大,则断裂时应力循环次数 N 越小;反之 σ 越小,则 N 越大。当应力低于某值时,应力循环无数次也不会发生疲劳断裂,此应力称为材料的疲劳强度,用 σ_D 表示。常用钢铁材料的疲劳曲线有明显的水平部分[见图1-10(a)],其他部分非铁合金的疲劳曲线上没有水平部分[见图1-10(b)],在这种情况下,规定循环次数从断裂时所对应的应力作为条件疲劳极限,以 σ_N 表示。

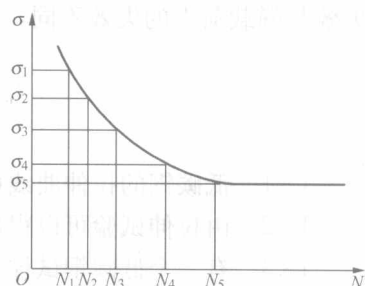


图1-9 疲劳曲线示意图

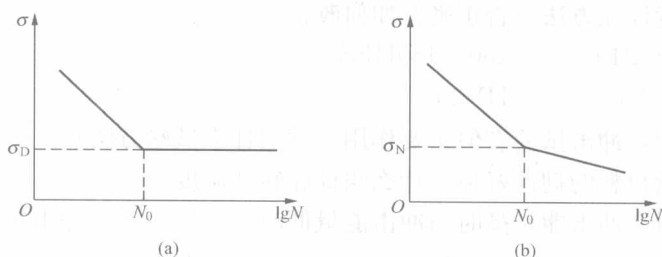


图1-10 疲劳曲线的两种类型

(a) 常用钢铁材料; (b) 部分非铁合金

通常材料疲劳性能的测定是在旋转弯曲疲劳试验机上进行的。具体试验方法请参阅 GB 4337—1984《金属旋转弯曲疲劳试验方法》。试验规范规定了各种金属材料的指定寿命(循环基数) N_0 (如合金钢为 10^7 ,低碳钢为 5×10^6),应力循环次数达到此基数仍不发生疲劳破坏,此时的最大应力可作为疲劳极限。通常,纯弯曲疲劳极限用 σ_{-1} 表示。

由于疲劳断裂通常是在机件最薄弱的部位或缺陷所造成的应力集中处发生的,因此疲劳失效对许多因素都很敏感,如零件外形、循环应力特性、环境介质、温度、机件表面状态、内部组织缺陷等。这些因素会导致疲劳裂纹的产生或加速裂纹扩展而降低疲劳寿命。

为了提高机件的疲劳抗力,防止疲劳断裂事故的发生,在进行机件设计和加工时,应选择合理的结构形状,以防止表面损伤,避免应力集中。由于金属表面是疲劳裂纹易于产生的地方,而实际零件大部分都承受交变弯曲或交变扭转载荷,表面应力最大,因此表面强化处理是提高疲劳强度的有效途径。合理设计零件结构、避免应力集中、降低表面粗糙度值、进行表面滚压、喷丸处理、表面热处理等,均可以提高工件的疲劳强度。

本章小结

本章主要介绍了金属的力学性能。金属的强度指标用应力来度量,常用的强度指标有屈服强度与抗拉强度。金属的塑性指标用拉伸试样断裂时的最大相对变形量来表示,常用断后