



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

JINSHU GONGYIXUE

金属工艺学

(第二版)

王健民 主编
刘 瑛 孙京平 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



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

JINSHU GONGYIXUE

金属工艺学

(第二版)

主 编 王健民
副主编 刘 瑛 孙京平
编 写 顾红欣 吴立国 刘 洁
主 审 陈金水 孟庆国



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”国家级规划教材。全书共五章,内容包括金属材料导论、铸造、金属压力加工、焊接、切削加工。本书以目前使用最广的钢铁材料为主,着重讲述各种金属加工工艺方法自身的规律性及其在机械制造中的应用,金属零件的加工工艺过程和结构工艺性,常用金属材料性能对加工工艺的影响,各种工艺方法的比较等。本书采用最新标准,坚持“少而精”,贯彻“以实用为主,够用为度”的原则,突出重点,注重理论与实践的紧密结合,充实了新工艺、新技术的介绍,在内容编排上,由浅入深、循序渐进,并在各章后面附有一定数量的复习题。

本书可作为高等院校机械类专业的教材,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属工艺学/王健民主编. —2版. —北京:中国电力出版社, 2009

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-8464-1

I. 金… II. 王… III. 金属加工-工艺学-高等学校-教材
IV. TG

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 012838 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 8 月第一版

2009 年 4 月第二版 2009 年 4 月北京第二次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 326 千字

定价 22.00 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

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是根据教育部审定的机械设计制造类专业主干课程的教学大纲编写而成的，供高等教育机械设计制造类专业教学使用。

本书体现了高等教育的性质、任务和培养目标；符合高等教育的课程教学基本要求和有关岗位资格及技术等级要求；具有思想性、科学性，适合国情的先进性和教学适用性；符合高等教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

按照学科体系，《金属工艺学》包括金属材料导论、铸造、金属压力加工、焊接和金属切削加工五章。本教材以目前使用最广的、在我国仍要大力发展的钢铁材料为引子，着重讲述各种金属加工工艺方法本身的规律性及其在机械制造中的应用；金属零件的加工工艺过程和结构工艺性；常用金属材料性能对加工工艺的影响；各种工艺方法的比较等。

《金属工艺学》在第一版的基础上全面贯彻有关的最新国家标准，坚持“少而精”，贯彻“以实用为主，够用为度”的原则，突出重点，注重理论与实践的紧密结合，充实了新工艺、新技术的介绍；在内容编排上，贯彻由浅入深、循序渐进的原则，并在各章后面附有一定数量的复习题，以引导学生独立思考，培养分析问题和解决问题的能力。本书可作为普通高等学校机械类专业课程教材，也可供有关工程技术人员参考。

本书编写人员如下。第一、第二章由刘瑛编写，第三、第四章由孙京平编写，第五章由王健民编写，由王健民担任主编，刘瑛、孙京平担任副主编。顾红欣、吴立国、刘洁参与了部分书稿的编写工作。

本书由天津大学陈金水教授和天津工程师范学院孟庆国教授主审。

由于编者水平有限，书中恐有欠妥与疏漏之处，恳请同行与广大读者指正。

编 者

目 录

前言

第一章 金属材料导论	1
第一节 金属材料的力学性能	1
第二节 铁碳合金	9
第三节 钢的热处理	21
复习题	28
第二章 铸造	31
第一节 铸造工艺基础	31
第二节 砂型铸造	38
第三节 特种铸造	59
第四节 常用铸造合金	64
第五节 铸件结构设计	73
复习题	76
第三章 金属压力加工	79
第一节 金属的塑性变形	79
第二节 锻造	84
第三节 板料冲压	96
第四节 压力加工新技术	100
第五节 锻压件的质量检测	103
复习题	104
第四章 焊接	105
第一节 熔焊	105
第二节 压焊	116
第三节 钎焊	117
第四节 其他焊接和气割方法	118
第五节 常用金属材料的焊接	120
第六节 焊接结构设计	124
第七节 焊接质量检验	128
第八节 焊接新技术	130
复习题	132
第五章 切削加工	133
第一节 金属切削加工的基础知识	133
第二节 外圆、内孔、平面加工	163
第三节 螺纹和齿轮加工	176

第四节	精整加工.....	184
第五节	特种加工.....	188
第六节	机械加工工艺过程.....	193
第七节	零件的结构工艺性.....	202
复习题		204
参考文献		208

第一章 金属材料导论

金属材料具有机械制造所需要的力学、物理和化学性能以及工艺性能,是现代机械制造业中应用最为广泛的材料。金属有纯金属和合金两类。合金是以一种金属为基础,加入其他金属或非金属,经过熔炼或烧结制成的具有金属特性的材料。机械制造中最常用的金属材料——钢和铸铁,就是以铁为主的铁碳合金。与纯金属相比,合金的强度、硬度较高,成本较低,并能通过改变合金的成分和进行一定的热处理来获得更好的力学性能和工艺性能,因此,机械制造中广泛应用的金属材料以合金为主,很少使用纯金属。

第一节 金属材料的力学性能

金属材料的力学性能又称机械性能,是材料在外力作用下所表现出来的各种性能。金属材料的力学性能是选材时的主要依据之一,它可通过各种不同的试验来测定。

一、金属材料的静态力学性能

金属材料的静态力学性能是指对试样缓慢加载时材料所表现出来的各种性能。

(一) 弹性、刚度、强度和塑性

材料的弹性、刚度、强度和塑性是通过静拉伸试验测定的。

按国家标准 GB/T 228—2002《金属材料 室温拉伸试验办法》将被测金属制成如图 1-1 所示的标准试样,图中试样直径为 d ,横截面积为 S_0 ,原始长度为 L_0 ,标距长度为 L 。在拉伸试验机上缓慢拉伸试样,使其承受轴向静拉力 F ,则试样轴向产生伸长。随着力的逐渐增加,伸长量 ΔL 逐渐增大,直到试样断裂。拉伸过程中,试验机自动记录每一瞬时的力 F 和伸长量 ΔL ,并绘出拉伸曲线。为能更直接地反映材料的力学性能,常用应力 R (任一时刻的力除以试样原始横截面积 S_0 之商, $R = \frac{F}{S_0}$) 代替力 F ,用伸长率 ϵ (伸长量与原始长度 L_0 之比的百分率, $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$) 代替伸长量 ΔL ,绘出应力—伸长率曲线。如图 1-2 所示为低碳钢的应力—伸长率曲线,已消除试样尺寸的影响,能直接反映材料的性能。从图 1-2 中可看出,

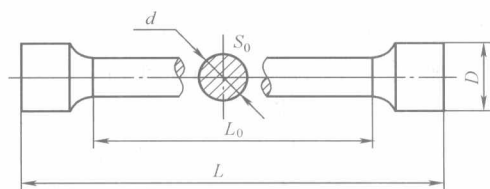


图 1-1 拉伸试样

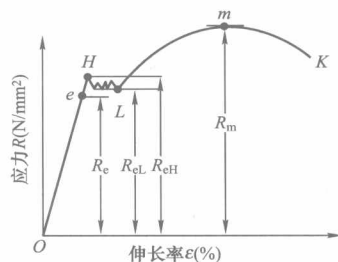


图 1-2 低碳钢的应力—伸长率曲线

通过静拉伸试验可测定金属材料的静态力学性能,主要有刚度、强度和塑性。

1. 弹性和刚度

由图 1-2 中可见,若加载后应力不超过 R_e ,即在图中 O_e 阶段,应力与伸长率呈线性关系,如卸载,试样即可恢复原始长度,这种不产生永久变形的性能称为弹性;变形为弹性变形;金属在弹性变形范围内,不产生永久变形的最大应力,称为弹性极限。弹性极限精确测定困难,常以非比例延伸强度 R_p 代替,例如 $R_{p0.2}$ 表示规定非比例延伸率为 0.2% 时的应力。

工程上,弹性元件如汽车板簧、仪表弹簧等均是按照弹性极限 R_e 来设计、选材的。

直线 O_e 的斜率,即应力与伸长率的比值 E 称为试样材料的弹性模量,工程上叫材料的刚度,是衡量材料产生弹性变形难易程度的指标。在使用中,若材料的刚度不足,机械零件会因发生过大的弹性变形而失效。弹性模量主要取决于金属材料本身,是金属材料最稳定的性能之一,合金化、热处理、冷热加工对它的影响很小。钢铁材料室温下的 E 值平均在 $(20 \sim 21.4) \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 范围内。

2. 强度

任一时刻的力除以试样原始横截面积 S_0 之商是应力,工程上称材料的强度。材料的强度反映材料在外力的作用下抵抗塑性变形和断裂的能力。

(1) 屈服强度。图 1-2 所示曲线中出现一段平台,应力未增加,但变形仍在进行,这种现象称为“屈服”。此时若卸载,将保留一部分残余的变形,试样不能恢复到原始长度,这种不能恢复的残余变形叫塑性变形。金属材料在外力作用下产生塑性变形(屈服现象)时,达到塑性变形而力不增加的应力点称为材料的屈服强度,表示材料抵抗微量塑性变形的能力。GB/T 228—2002 规定屈服强度分为上屈服强度 R_{eH} 和下屈服强度 R_{eL} 。上屈服强度 R_{eH} 是指试样发生屈服而应力首次下降前的最高应力;下屈服强度 R_{eL} 是指屈服期间不计初始瞬时效应时的最低应力。由于上屈服强度 R_{eH} 对微小应力集中、试样偏心和其他因素很敏感,试验结果相当分散,一般情况下,工程中进行设计计算、确定材料的许用应力时所选用的屈服强度指下屈服强度 R_{eL} 。

应注意的是,有些金属材料没有明显的屈服现象发生。按 GB/T 228—2002 规定,此时,可用规定残余伸长强度 R_r 表示材料塑性变形的抗力,即材料卸载后,标距部分残余伸长率达到规定数值时的应力。如 $R_{r0.2}$ 表示规定残余延伸率达到 0.2% 时的应力值。

(2) 抗拉强度。应力超过屈服强度时,整个试样发生均匀而显著的塑性变形。见图 1-2,应力达到 m 点后,试样上某部分开始变细,出现“缩颈”现象,其截面缩小,此后,所需应力下降,继续变形主要集中于缩颈处;应力到达 K 点时,试样在缩颈处断裂。显然,在 m 点处,应力达到峰值,材料产生了最大的均匀变形。 R_m 是金属材料在被拉断前所能承受的最大应力,称为抗拉强度。

R_{eL} 和 R_m 是设计零件和选择材料的主要参数之一。工程中,绝大多数零件,如紧固螺栓、汽车连杆、机床丝杠等,在工作时不允许发生明显的塑性变形,否则将丧失其自身精度或使其与其他零件的配合受到影响,常以 R_{eL} 作为强度设计的依据;对工作时一般不发生塑性变形而直接断裂的脆性材料,或对塑性变形要求不高而仅要求工作时不发生断裂的零件如钢丝绳、建筑结构件等,应以 R_m 作为强度设计的依据。 R_{eL} 与 R_m 的比值(即屈强比)愈小,零件或构件工作的可靠性愈高,但材料强度的有效利用率愈低。

合金化、热处理、冷热加工对 R_{eL} 和 R_m 的影响很大。

3. 塑性

塑性是金属材料产生塑性变形而不被破坏的能力。常用断后伸长率 A 和断面收缩率 Z 来表示塑性

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%$$

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%$$

式中 L_0 ——试样原始长度, mm;

L_u ——试样拉断后的长度, mm;

S_0 ——试样原始横截面积, mm²;

S_u ——试样拉断后的横截面积, mm²。

A 、 Z 数值越大, 材料的塑性越好。良好的塑性可以保证金属材料能够顺利承受各种变形加工, 同时, 可以提高零件使用的可靠性, 万一超载, 零件不至于马上断裂。值得注意的是, A 值与试样尺寸有关, 试验时一般规定试样尺寸以便于比较。若 $L_0 = 5.65\sqrt{S_0}$, 则用符号 A 表示; 若 $L_0 = 11.3\sqrt{S_0}$, 则用符号 $A_{11.3}$ 表示。

如图 1-3 所示为高碳钢、低合金结构钢和黄铜的应力—伸长率曲线。由图 1-3 中可以看出, 高碳钢不发生明显的塑性变形, 属脆性材料; 低合金结构钢有明显的屈服平台; 铜虽然是塑性材料, 但曲线上不出现明显的屈服段。

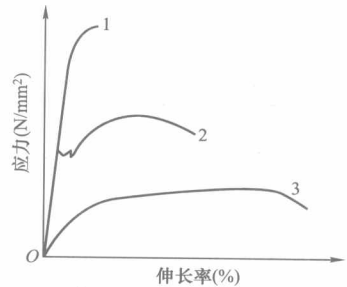


图 1-3 典型材料在室温下的应力—伸长率曲线

1—高碳钢; 2—低合金结构钢; 3—黄铜

以上内容的符号和单位均选自 GB/T 228—2002, 新旧标准中的性能名称及符号列于表 1-1。

表 1-1

新旧标准中的性能名称及符号对照

新标准 (GB/T 228—2002 《金属材料 室温拉伸试验方法》)		旧标准 (GB/T 228—1987 《金属拉伸试验方法》)	
性能名称	符 号	性能名称	符 号
弹性极限	R_e	弹性极限	σ_e
规定非比例延伸强度	R_p , 如 $R_{p0.2}$	规定非比例伸长应力	σ_p , 如 $\sigma_{p0.2}$
—	—	屈服点	σ_s
上屈服强度	R_{eH}	上屈服点	σ_{sU}
下屈服强度	R_{eL}	下屈服点	σ_{sL}
抗拉强度	R_m	抗拉强度	σ_b
规定残余延伸强度	R_r , 如 $R_{r0.2}$	规定残余伸长应力	σ_r , 如 $\sigma_{r0.2}$
断后伸长率	A , $A_{11.3}$, A_{Xmm}	断后伸长率	δ_5 , δ_{10} , δ_{Xmm}
断面收缩率	Z	断面收缩率	ψ

(二) 硬度

金属表面抵抗其他硬物压入的能力, 或金属材料抵抗局部塑性变形、压痕的能力称为硬

度。它反映材料的软硬程度, 直接影响材料的耐磨性和切削加工性。通常, 硬度越高, 材料的耐磨性越好, 越难于切削加工。

材料的硬度在硬度计上测定。工程上常使用布氏硬度法、洛氏硬度法和维氏硬度法。

1. 布氏硬度 (HB)

按照 GB/T 231.1—2002《金属布氏硬度试验 第1部分: 试验方法》, 在静压力 F 的作

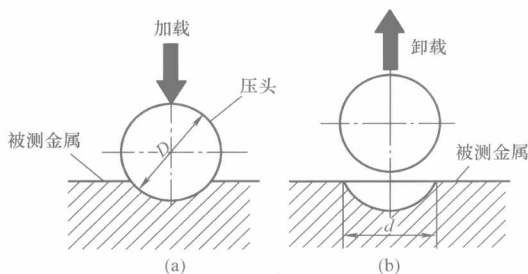


图 1-4 布氏硬度的测定

(a) 加载; (b) 卸载

用下, 将直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球压头压入被测材料的表面, 保持规定的时间后, 卸去载荷, 得到直径为 d 的压痕, 如图 1-4 所示。测出压痕直径 d , 用载荷除以压痕表面积即可得到布氏硬度 HB 值, 也可从专门的硬度表格中查出 HB 值。

用布氏硬度计测试不同材料和不同厚度的试样时, 可参照表 1-2 选择不同的压头直径、载荷及其保持时间。

表 1-2

布氏硬度测试规范

材料	硬度范围 (HB)	试样厚度 (mm)	钢球直径 D (mm)	载荷 F (kN)	载荷保持时间 (s)
黑色金属	140~450	6~3 4~2 <2	10 5 2.5	30 7.5 1.875	10
	<140	>6 6~3 <3	10 5 2.5	10 2.5 0.625	10
铜合金及 镁合金	36~130	>6 6~3 <3	10 5 2.5	10 2.5 0.625	30
铝合金及 轴承合金	8~35	>6 6~3 <3	10 5 2.5	2.5 0.625 0.156	60

布氏硬度法因压痕面积大, 测量结果误差小, 硬度值较稳定, 故测试数据重复性好, 准确度较高。但较大压痕使其不适用于成品零件及薄而小的零件的检验; 另外, 由于测量过程相对较为麻烦, 也不适于大批量生产的零件检验。布氏硬度法通常用于 HB 值小于 450 的材料, 如灰铸铁、非铁合金和较软的钢材。

符号 HBS 表示淬火钢球压头测得的硬度值, 符号 HBW 表示硬质合金压头测得的硬度值。硬度数值置于硬度符号前, 如 350HBW。

2. 洛氏硬度 (HR)

如图 1-5 所示, 在规定的载荷下, 将特定的压头垂直压入被测金属表面, 卸载后根据压痕的深度 h , 可直接由刻度盘的指针读出材料的洛氏硬度值。压痕越深, 材料越软, 硬度值越低; 反之, 硬度值越高。

常用的洛氏硬度有三种, 分别以 HRA、HRB、HRC 来

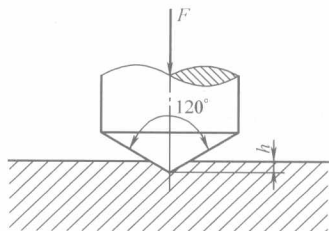


图 1-5 洛氏硬度的测定

表示。硬度数值置于硬度符号前,如 60HRC、80HRA 等。测试不同材料的洛氏硬度时,可参照表 1-3 选择各硬度标尺的压头类型、总载荷。生产中以 HRC 标尺应用最多,常用于一般淬火钢或工具。

表 1-3

洛氏硬度测试规范

标尺	压头类型	总载荷 (N)	适用测试材料	有效值
HRA	120°金刚石圆锥体	588.4	硬质合金、表面淬火钢	70~85
HRB	$\phi 1.588\text{mm}$ 淬火钢球	980.7	软钢、退火钢、非铁合金	25~100
HRC	120°金刚石圆锥体	1471	一般淬火钢件	20~67

洛氏硬度测试简单,且压痕小,可用于成品检验。但测得的硬度值重复性较差,需在不同部位测量数次。

3. 维氏硬度 (HV)

维氏硬度的测试原理基本与布氏硬度相同。不同之处在于维氏硬度采用锥面夹角为 136° 的金刚石正四棱锥体的压头,压痕为正四方锥形,如图 1-6 所示。

维氏硬度法压痕浅,适用于测量零件薄的表面硬化层、金属镀层及薄片金属的硬度;另外,由于压头是金刚石角锥,载荷可调范围大,因此维氏硬度法对软硬材料均适用,测试范围为 $0\sim 1000\text{HV}$ 。

值得指出的是,由于各种硬度试验法的试验条件不同,测定的硬度值不能直接进行比较,相互间也无理论换算关系。但通过实践发现,在一定条件下存在着某种粗略的经验换算关系。如在 $200\sim 600\text{HBW}$ 范围内, $1\text{HRC}\approx 1/10\text{HBW}$;在小于 450HBW 时, $1\text{HBW}\approx 1\text{HV}$ 。

硬度值综合反映了材料在局部范围内抵抗塑性变形的能力,与强度有一定的关系。对不同的材料,工程实践中常使用下列经验公式:低碳钢 $R_m\approx 3.53\text{HBW}$;高碳钢 $R_m\approx 3.33\text{HBW}$;调质合金钢 $R_m\approx 3.19\text{HBW}$;灰铸铁 $R_m\approx 0.98\text{HBW}$;退火铝合金 $R_m\approx 4.70\text{HBW}$ 。

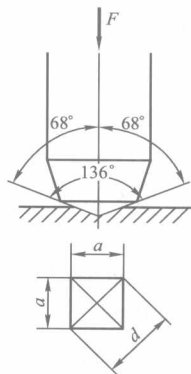


图 1-6 维氏硬度的测定

二、金属材料的动态力学性能

绝大多数机械零件都是在动载荷下工作的。作用于机械零件的动载荷主要有两种形式:一种是载荷以较高的速度作用于零件上,形成冲击,称为冲击载荷;另一种是载荷的大小或方向呈周期性或非周期性变化地作用于零件上,称为循环载荷。在动载荷作用下,金属材料的力学性能主要有韧性和疲劳强度。

(一) 韧性

零件在工作中受到的瞬时冲击载荷作用所引起的变形和应力要比静载荷所引起的变形和应力大得多,因此,在选用零件材料时,必须要考虑金属材料抵抗冲击载荷的能力,即韧性。低韧性的材料易于发生脆性断裂而造成极大危害,如压力容器的爆炸、船舶的脆断沉没、电站转子的断裂等。评定材料韧性的力学性能指标主要有冲击韧度和断裂韧度。

1. 冲击韧度

常用金属材料断裂前所吸收的冲击功与断口横截面积的比值作为韧性的指标,称为冲击韧度。它是采用一定尺寸和形状的带缺口的标准冲击试样,在摆锤式冲击试验机上测定的。

如图 1-7 所示, 具有质量 m (kg) 的摆锤从规定高度 H_1 (m) 处自由落下, 将试样冲断后, 摆锤摆至高度 H_2 (m) 处。单位横截面积上所吸收的冲击功, 即冲击韧度 α_k (J/m^2) 为

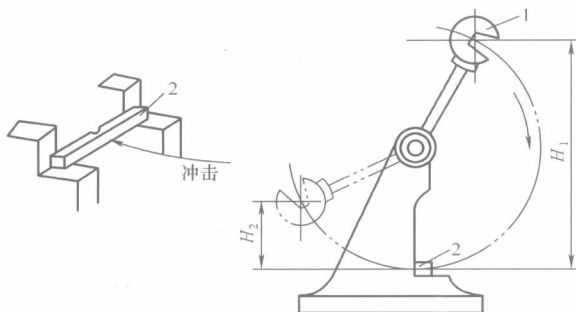


图 1-7 冲击试验示意图

1—摆锤；2—试样

$$\alpha_k = \frac{A_K}{A} = \frac{mH_1 - mH_2}{A} \times 9.8$$

式中 A_K ——冲断试样所消耗的冲击功, J;

A ——试样缺口处的截面积, m^2 。

冲击韧度代表了在指定温度下材料在缺口和冲击加载共同作用时的脆化趋势及其程度, 是一个成分结构极敏感性参数。冲击韧度的大小不仅取决于材料, 还受到环境温度、试样形状、表面粗糙度、内部组织等因素的影响。因此, 冲击韧度在生产与研究上得到了较广泛的应用, 能够反映材料的冶金质量和各种热加工工艺质量, 如疏松、气孔、夹渣、过热、锻造与焊接裂纹、回火脆性等, 可以用以检验和控制工艺与产品质量; 能够反映材料对一次或少数次大能量冲击破坏的抵抗能力, 可以用于评定在此工作条件下材料对缺口的敏感性, 还可以用于评定材料的冷脆性。

虽然冲击韧度的测定较为简单, 实际生产中也积累了大量的数据用于设计选材参考和产品质量控制, 但是, 它仅反映材料在一次或少数次大能量冲击加载条件下抵抗变形和断裂的能力, 而工程实际中许多机械零件承受的是小能量的多次冲击载荷, 如锻锤的锤杆、锻模等, 因此, 冲击韧度不能直接用于设计计算。材料抵抗小能量多次冲击载荷而不破坏的能力称为多冲抗力, 可通过多次重复冲击试验测定。

如图 1-8 所示为多次重复冲击弯曲试验原理图, 专用试样在多冲试验机上受到锤头小于 1500J 的小能量多次冲击。多冲抗力用材料在一定冲击能量下开始出现裂纹和最后破断的冲击次数来评定。材料的小能量多冲抗力是以强度为主, 塑性、韧性为辅的综合性能指标。材料的冲击韧度对多冲抗力的影响与其强度水平有关, 在中、低强度范围内, 因韧性已足够, 冲击韧度的提高对多冲抗力的影响不大; 但在高强度范围内 (如 $R_m > 1300\text{N}/\text{mm}^2$), 改善韧性对多冲抗力的提高有利。

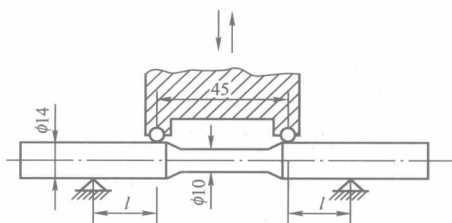


图 1-8 多次重复冲击弯曲试验原理图

2. 断裂韧度

现代工业中的许多零件在高速重载下工作, 要求使用高强度材料。但在工程实际中, 这些高强度材料在工作应力远低于材料屈服强度时, 仍有可能发生脆性断裂——低应力脆断, 造成严重的危害, 如 20 世纪 50 年代美国“北极星”导弹和英国“彗星”飞机的失事。

断裂力学的研究表明, 由于冶金缺陷、加工损伤或使用等原因, 材料中不可避免地存在着微小的宏观裂纹, 这些宏观裂纹在外力作用下, 必然存在应力集中, 从而在工作后期高速扩展, 产生低应力脆断。用以表征材料抵抗裂纹失稳扩展能力的指标称为断裂韧度。断裂韧

度不仅取决于材料的成分组织结构,还受工作温度、环境介质等外部因素的影响。

(二) 疲劳强度

齿轮、曲轴、弹簧等机械零件工作时承受循环载荷,载荷的大小、方向随时间发生周期性的循环变化。此时,虽然零件所承受的应力往往低于材料的屈服强度,但材料中含有杂质或加工过程中形成的表面划痕或局部应力集中等因素可能导致产生初始微裂纹,随着应力循环次数的增加,微裂纹逐渐扩展,零件可能发生疲劳断裂。据统计,约80%的机械零件的断裂属于疲劳断裂。机械零件的疲劳断裂属于低应力脆断,断裂时的应力甚至低于材料的屈服强度,断裂前材料无明显的塑性变形,是一种无预兆的、突然发生的断裂,因而具有较大的危害性。

试验证明,金属材料所承受的最大应力与疲劳断裂前应力的循环次数的关系如图1-9所示。图1-9的疲劳曲线表明,应力越小,循环次数越大,当应力低于某一值时,材料可经无数次应力循环而不发生疲劳断裂,这个应力值称为材料的疲劳强度。不同的循环载荷作用下材料的疲劳强度用不同的符号表示,例如用 R_{-1} 表示对称循环载荷作用下材料的疲劳强度,用 R_0 表示脉动循环载荷作用下材料的疲劳强度。

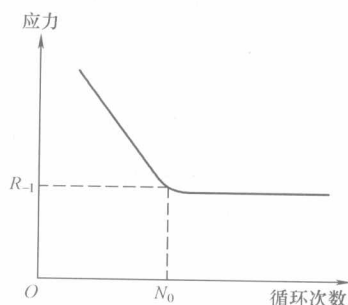


图1-9 疲劳曲线

金属的疲劳强度与抗拉强度之间存在着如下的近似比例关系:碳素钢 $R_{-1} \approx (0.4 \sim 0.55) R_m$; 灰铸铁 $R_{-1} \approx 0.4 R_m$; 有色金属 $R_{-1} \approx (0.3 \sim 0.4) R_m$ 。

由于试验时不可能做到无数次应力循环,工程上常规定:当金属材料的应力循环次数达到一定值仍不发生疲劳断裂,就认为不会再发生疲劳断裂了。这个循环次数称为循环基数,即图1-9中疲劳曲线上水平线的起始点所对应的循环次数 N_0 。钢铁材料的循环基数通常取为 10^7 。

疲劳强度值受材料的成分和组织结构、零件表面强化处理、零件表面状况、载荷类型、工作温度等因素的影响。为了提高零件的疲劳强度,应采取改善其结构形状、减小应力集中、进行表面强化以及控制材料的内部质量等措施,以减少初始微裂纹的产生、减缓微裂纹的扩展。

三、高低温下金属材料的力学性能

(一) 高温性能

随着温度的升高,弹性模量、屈服强度、硬度等值将下降,塑性将增加,因此,室温下测定的性能指标不能代表金属材料在高温下的性能。高温长时间应力下工作的金属材料,即使所加应力小于该温度下的屈服强度,也会产生明显的塑性变形直至发生断裂,这种现象称为金属材料的蠕变。因此,高温下使用的金属材料,应具有足够的抗蠕变能力。

有弹性变形的材料,随时间增长,总伸长率保持不变,但弹性变形逐步转化为塑性变形,应力自行逐渐衰减,材料也出现蠕变现象。机械紧固件若出现应力松弛的蠕变现象,紧固将会失效。

(二) 低温性能

随着温度的下降,多数材料会出现脆性增加的现象,严重时甚至发生脆断。材料的低温韧性越差,随着温度的下降,材料越容易由韧性状态转为脆性状态。

四、金属材料的物理性能、化学性能和工艺性能

用于机械制造的金属材料,除了应具有以上力学性能,还应具有一定的物理性能、较好的化学稳定性以及优良的工艺性能。

(一) 金属材料的物理性能

金属材料的物理性能主要有密度、熔点、热膨胀性、导热性等。

1. 密度

单位体积的物质质量称为密度。钢铁密度约为 $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。金属材料中,密度在 $4.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 以下的称为轻金属,典型代表为铝(密度为 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)。轻金属材料对轻量化零件如航天航空机械、运输机械等具有重要的应用意义。

2. 熔点

熔点是材料由固态向液态转变的特征温度。材料的熔点对零件的耐温、耐热性能具有重要的应用意义,且影响其熔炼、铸造和焊接等工艺。一般,金属材料具有确定的熔点。

3. 热膨胀性

因温度的升降而引起材料体积膨胀或收缩的现象称为热胀冷缩。表征材料热膨胀性的指标主要有线胀系数和体胀系数。热膨胀性在工程设计、选材和加工等方面应用广泛,例如精密仪器及形状尺寸精度要求较高的零件应选用膨胀系数小的材料;在使用或加工过程中应注意,材料可能因温度变化产生不均匀热胀冷缩,造成很大的内应力,导致零件变形或开裂。

4. 导热性

热能由高温区向低温区传输的现象称为导热。材料的导热性对其冷、热加工性能有着较大影响,如材料在铸造、热锻、焊接、热处理等加热和冷却过程中会因导热性不良而引起零件变形或开裂。表征材料导热性的指标有热导率和传热系数。一般金属材料的热导率约为 $(20 \sim 400) \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,具有良好的导热性。

(二) 材料的化学性能

金属材料的化学性能主要是指材料在室温或高温下抵抗各种介质侵蚀的能力,如耐酸性、耐碱性、抗氧化性等。

材料在生产、加工和使用时,会与环境介质如大气、海水、各种酸溶液、碱溶液、盐溶液等发生复杂的化学反应,导致性能恶化甚至功能丧失,其中腐蚀问题最为普遍。选择不锈钢、铜合金等耐蚀材料或耐热钢、耐热铸铁等抗氧化材料,或对金属材料进行表面处理,如表面电镀、表面涂层等,均能有效提高零件的耐蚀性。

选择金属材料时,应根据零件的具体用途,选择满足其物理和化学性能要求的金属材料。例如,飞机零件常选用密度小的铝、钛合金制造,化工和医疗设备常选用不锈钢制造。

(三) 材料的工艺性能

从材料到零件或产品的整个生产过程涉及多种加工方法,要求材料具有相应的工艺性能。工艺性能是指金属材料对各种加工方法的适应性,代表材料能经济地适应各种加工工艺而获得规定的性能和外形的能力,也是金属材料的物理性能、化学性能和力学性能在加工过程中的综合反映。材料的工艺性能不仅取决于材料的成分、组织和结构,而且受各种加工工艺条件的影响。在一定程度上,材料的工艺性能影响零件的性能、外观、生产率和成本。

(1) 铸造性能。主要包括金属材料的流动性、收缩、疏松、吸气性、铸造应力及冷热裂纹倾向等。例如,灰铸铁的铸造性能优良,适于铸造。

(2) 锻造性能。主要指锻造时,金属材料塑性的好坏和变形抗力的大小。塑性越高,变形抗力越小,则锻造性能越好。

(3) 焊接性能。主要指在一定焊接工艺条件下,获得优质焊接接头的难易程度。焊接性能受材料本身的特性和工艺条件的影响,主要包括焊接接头产生缺陷的倾向性和焊接接头的使用可靠性。

(4) 切削加工性能。指对零件材料进行车、铣、刨、磨等各种切削加工的难易程度。材料的切削加工性能与材料本身的化学成分和内部组织结构有关,一般,在材料的化学成分确定后,可通过热处理改善其切削加工性能。生产实践中,一般以硬度来评定材料的切削加工性能,材料的硬度在(180~230) HBW 范围内时,切削加工性能良好。

(5) 热处理性能。指材料热处理的难易程度和产生热处理缺陷的倾向。可用淬硬性、淬透性、回火稳定性、热处理变形开裂倾向等多个指标和参数来衡量材料的热处理性能。钢淬火时所能达到的最高硬度值,表明钢的淬硬能力,称为钢的淬硬性,钢的淬硬性主要取决于含碳量。钢在淬火时获得淬硬层深度的能力称为钢的淬透性,钢的淬透性主要取决于合金元素含量。钢在淬火后的回火过程中抵抗强度、硬度下降的能力称为回火稳定性,钢的回火稳定性高表明在相同温度下回火的强度、硬度高。

第二节 铁 碳 合 金

钢铁是现代工业中应用最为广泛的金属材料,其基本组元是铁和碳两种元素,统称铁碳合金。普通碳钢和铸铁属于铁碳合金范畴,在碳钢和铸铁中加入合金元素就形成了合金钢与合金铸铁。

一、晶体结构及其纯铁的同素异晶转变

(一) 晶体结构

1. 晶体、晶格、晶胞、晶格常数

钢和铸铁等固态金属一般都是晶体。晶体是指原子(或离子、分子)在空间按一定的几何形状有规律地重复排列的物体。如图 1-10 所示即为简单的晶体模型。晶体中原子(或离

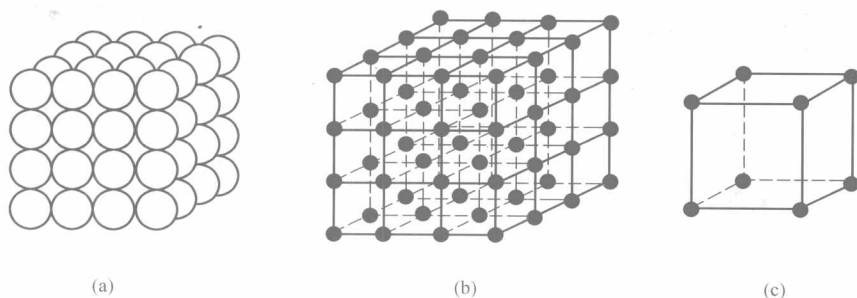


图 1-10 简单的晶体模型

(a) 原子排列模型 (b) 晶格 (c) 晶胞

子、分子)在空间规则排列的方式称为晶格结构。为便于分析晶体中的原子排列规律,常将晶体中的原子假想为几何结点,并用假想的直线将相邻原子中心连接起来,使之构成一个可以表示原子排列形式的空间格子,这就是晶格。晶格中的每个点称为节点。构成晶格的最基本的几何单元称为晶胞。晶胞中各棱边的长度称为晶格常数,以 $\text{\AA}$ (埃) 为单位 ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$), 金属的晶格常数大约为 $(1\sim 7)\text{\AA}$ 。各种金属晶体结构的晶格结构和晶格常数不同,其物理、化学以及力学性能也不相同。

2. 晶面、晶向

晶格中各种方位的原子面称为晶面。晶格中由原子所组成的任一直线,都能代表晶体空间的一个方向,称为晶向。

3. 金属晶格结构

工业上使用的金属元素中,原子趋于紧密排列,构成的晶格结构较为简单。约有 90% 以上的金属晶格结构都属于体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格结构。

(1) 体心立方晶格。

如图 1-11 (a) 所示,体心立方晶格的晶胞是一个各晶格常数相等的立方体,在立方体的八个顶角上各有 1 个原子,在立方体的中心还有 1 个原子。

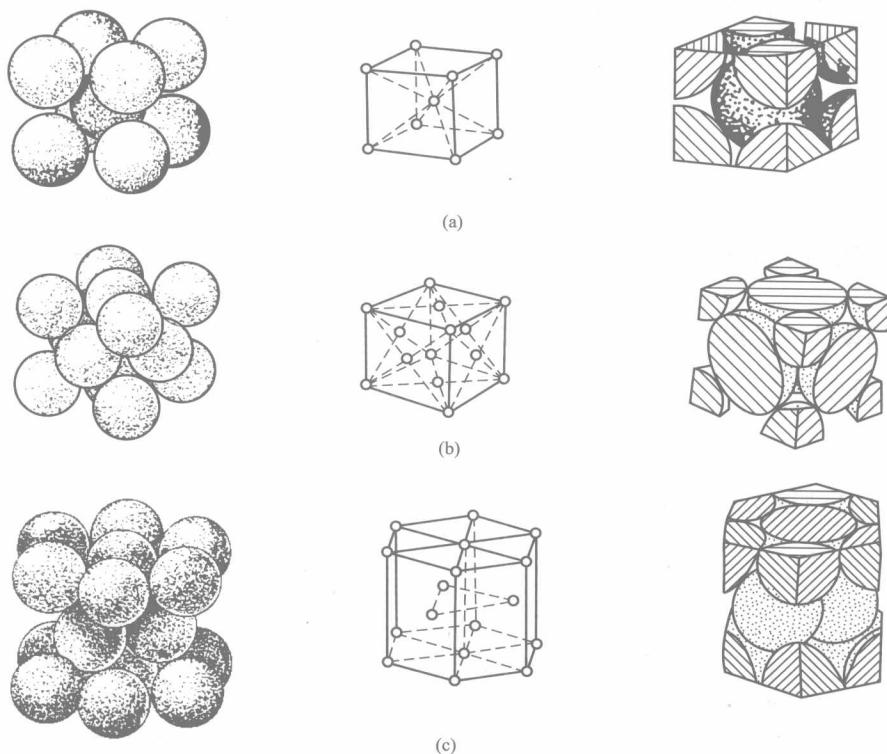


图 1-11 金属的晶胞

(a) 体心立方晶胞; (b) 面心立方晶胞; (c) 密排六方晶胞

体心立方晶胞每个角上的原子为相邻的 8 个晶胞所共有,即只有 $1/8$ 个原子属于单个晶胞,晶胞中心的原子为该晶胞独有,故实际上每个体心立方晶胞所含的原子数为 2 个 (即 $8 \times$

$1/8+1=2$)。

晶胞中原子排列的紧密程度可用晶胞中原子所占的体积与该晶胞体积之比来表示,称为致密度。体心立方晶胞的致密度为 0.68,即体心立方晶格中,原子占据了 68% 的体积,余下的 32% 的体积是晶格间隙。

具有体心立方晶格的金属有 α -Fe、Cr、Mn、Mo、W、V 等。

(2) 面心立方晶格。

如图 1-11 (b) 所示,面心立方晶格的晶胞也是一个各晶格常数相等的立方体,在立方体的八个顶角上各有 1 个原子,并且在立方体六个面的中心各有 1 个原子。

面心立方晶胞每个角上的原子为相邻的 8 个晶胞所共有,每个面心位置的原子属于 2 个晶胞共有,故实际上每个面心立方晶胞所含的原子数为 4 个(即 $1/8 \times 8 + 1/2 \times 6 = 4$)。面心立方晶胞的致密度为 0.74。

具有面心立方晶格的金属有 γ -Fe、Al、Cu、Ni、Ag 等。

(3) 密排六方晶格。

如图 1-11 (c) 所示,密排六方晶格的晶胞是六方柱体,由 6 个长方形侧面和两个六边形底面组成。在六方体的 12 个顶角上和上、下底面的中心各有一个原子,另有 3 个原子均匀分布在晶胞中间。

密排六方晶胞每个角上的原子为相邻的 6 个晶胞所共有,上、下底面中心的原子属于 2 个晶胞共有,晶胞内部的 3 个原子为该晶胞独有,故实际上每个密排六方晶胞所含的原子数为 6 个(即 $1/6 \times 12 + 1/2 \times 2 + 3 = 6$)。密排六方晶胞的致密度为 0.74。

具有面心立方晶格的金属有 Mg、Zn、Be、Cd 等。

(二) 金属的结晶

广义上,物质从一种原子排列状态(晶态或非晶态)过渡到另一种原子规则排列状态的转变过程称为结晶。通常将液态转变为固态晶体称为一次结晶,将由一种固态转变为另一种固态晶体称为二次结晶或重结晶。

1. 纯金属结晶的条件

液态纯金属缓慢冷却的过程中,温度随时间变化的关系称为冷却曲线,如图 1-12 所示。由图 1-12 中可见,当液态金属缓慢冷却到理论结晶温度(即熔点) T_m 时,并未开始结晶,当温度连续下降到 T_m 以下的某个温度 T_n 时才开始有效结晶, T_n 称为金属的实际开始结晶温度。而后,由于结晶过程释放的结晶潜热超过了液体散发的热量,金属的温度迅速回升,直至释放的结晶潜热与散发的热量相等,曲线上出现低于 T_m 的结晶“平台”,结晶在此恒温下进行,直至结晶完成,温度才继续下降。

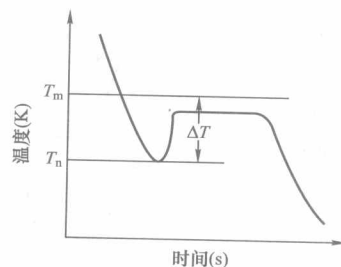


图 1-12 纯金属结晶时的冷却曲线

金属的实际结晶温度低于理论结晶温度的现象称为过冷,差值 $\Delta T = T_m - T_n$ 称为过冷度。过冷度的大小与金属的纯度和冷却速度有关,金属纯度越高,过冷度越大;冷却越快,过冷度越大。

结晶的必要条件是具有一定的过冷度。过冷度越大,结晶速度越快。