

中等专业学校试用教材

金属工艺学

(机械工程材料)

杭州机械工业学校 张至丰 主编

ZHONGDENG
ZHUANYE
XUEXIAO
JIAOCAI



机械工业出版社

TG
83
3:2

中等专业学校试用教材

金属工艺学

(机械工程材料)

杭州机械工业学校 张至丰 主编



机械工业出版社



3

622739

常 用 符 号

σ_e	弹性极限	F	铁素体；载荷
σ_s	屈服强度（屈服极限）	A	奥氏体
$\sigma_{0.2}$	条件屈服强度	A'	残余奥氏体
σ_b	抗拉强度（强度极限）	Fe_3C	渗碳体
σ_{-1}	对称循环载荷下测定的疲劳极限	P	珠光体
δ	延伸率	L_d	高温莱氏体
δ_5	短试样（ $l_0 = 5d_0$ ）延伸率	L_c	低温莱氏体
δ_{10}	长试样（ $l_0 = 10d_0$ ）延伸率	A_1	共析转变平衡临界点
ψ	断面收缩率	A_m	铁素体 $\rightleftharpoons$ 奥氏体转变点
a_K	冲击韧性	A_{cm}	奥氏体析出或溶入渗碳体的平衡临界点
A_K	冲击功	$Ac_1, Ac_3, Accm$	加热时的临界点
HBS	用钢球（作压头）的布氏硬度	Ar_1, Ar_3, Ar_{cm}	冷却时的临界点
HRW	用硬质合金（作压头）的布氏硬度	V_k	临界冷却速度
HRA	洛氏A标度硬度	S	索氏体（细珠光体）
HRB	洛氏B标度硬度	T	屈氏体（极细珠光体）
HRC	洛氏C标度硬度	B	贝氏体
HV	维氏硬度	M	马氏体
L	液相、液态、液体	Me	合金元素
T 或 t	温度	M_s	马氏体转变开始温度
N	结晶过程中的形核率	M_f	马氏体转变终了温度
G	结晶过程中的线长大速度；石墨	D_0	临界淬透直径
w_C	碳的质量分数		

目 录

结论	1	思考题与练习题	27
一、我国材料工业发展概况	1	第三章 加工硬化与再结晶	28
二、工程材料在机械制造业中的作用与地位	1	§ 3-1 金属塑性变形简介	28
三、机械工程材料课的主要内容	2	§ 3-2 加工硬化	28
四、本课程的特点和学习方法	2	一、加工硬化现象	28
第一章 金属的机械性能	3	二、产生加工硬化的原因	29
§ 1-1 强度和塑性	3	三、加工硬化在生产中的利弊	29
一、强度	3	§ 3-3 回复与再结晶	30
二、塑性	5	一、回复	30
§ 1-2 硬度	5	二、再结晶	30
一、布氏硬度	6	三、晶粒长大	31
二、洛氏硬度	7	§ 3-4 热加工与冷加工的概念	32
三、维氏硬度	8	思考题与练习题	33
§ 1-3 冲击韧性	8	第四章 二元合金状态图	34
一、摆锤式一次冲击试验	9	§ 4-1 合金的基本概念	34
二、多次冲击试验的概念	10	一、合金	34
§ 1-4 疲劳的概念	10	二、组元	34
§ 1-5 实验—金属的机械性能	11	三、系	34
一、硬度实验	11	四、相	34
二、一次冲击韧性实验	14	五、组织	34
思考题与练习题	14	§ 4-2 合金的结构	35
第二章 金属的晶体结构与结晶	16	一、固溶体	35
§ 2-1 金属的晶体结构	16	二、金属化合物	37
一、晶体与非晶体	16	三、机械混合物	38
二、晶体结构的基本知识	16	§ 4-3 二元合金状态图	39
三、常见金属的晶格类型	17	一、二元合金状态图的建立	39
四、晶格的致密度	18	二、共晶状态图	40
§ 2-2 金属的实际晶体结构	19	三、匀晶状态图	43
一、多晶体结构	19	四、共析状态图	44
二、晶体中的缺陷	20	思考题与练习题	44
§ 2-3 纯金属的结晶	22	第五章 铁碳合金状态图	46
一、纯金属的冷却曲线和过冷现象	22	§ 5-1 铁碳合金的基本组织	46
二、金属的结晶过程	23	一、铁素体	46
三、晶粒大小对金属机械性能的影响	24	二、奥氏体	47
四、细化晶粒的方法	25	三、渗碳体	47
§ 2-4 金属的同素异晶转变	26	四、珠光体	47
		五、莱氏体	48

§ 5-2 铁碳合金状态图分析	48	§ 7-1 概述	72
一、简化的铁碳合金状态图	48	§ 7-2 钢在加热时的组织转变	72
二、铁碳合金状态图分析	48	一、奥氏体的形成	73
§ 5-3 钢的结晶过程	50	二、影响奥氏体形成的因素	74
一、共析钢的结晶过程	50	三、奥氏体晶粒长大及控制	74
二、亚共析钢的结晶过程	50	§ 7-3 钢在冷却时的组织转变	75
三、过共析钢的结晶过程	50	一、过冷奥氏体的等温转变	76
§ 5-4 合金成分、组织、性能之间的关系 和铁碳合金状态图的应用	52	二、过冷奥氏体的连续冷却转变	79
一、碳的质量分数对平衡组织的影响	52	三、马氏体的组织形态和性能特点	80
二、碳的质量分数对机械性能的影响	53	§ 7-4 钢的退火与正火	82
三、铁碳合金状态图的应用	53	一、退火	82
§ 5-5 课堂讨论铁碳合金状态图	54	二、正火	84
一、讨论目的	54	三、退火与正火的选择	84
二、讨论题	54	§ 7-5 钢的淬火与回火	85
三、讨论方法 (仅供参考)	54	一、淬火	85
§ 5-6 实验二 铁碳合金平衡组织的观 察	55	二、回火	89
一、实验目的	55	三、钢的淬透性	92
二、铁碳合金在平衡状态下的组织特征	55	§ 7-6 钢的表面热处理	95
三、实验设备及材料	56	一、钢的表面淬火	95
四、实验步骤	56	二、钢的化学热处理	97
五、实验报告要求	57	§ 7-7 其它热处理工艺简介	101
附一 金相显微镜的使用	57	一、形变热处理	101
附二 金相试样的制备	59	二、真空热处理	102
思考题与练习题	61	三、可控气氛热处理	103
第六章 碳钢	63	四、激光热处理	103
§ 6-1 钢铁生产	63	§ 7-8 课堂讨论钢的热处理	104
一、炼铁	63	一、讨论目的	104
二、炼钢	63	二、讨论题目	104
§ 6-2 钢中常存杂质元素的影响	65	三、讨论方法 (仅供参考)	104
一、硅的影响	65	§ 7-9 实验三 钢的热处理	104
二、锰的影响	65	一、实验目的	104
三、硫的影响	65	二、热处理工艺的确定	105
四、磷的影响	66	三、实验设备及材料	106
§ 6-3 碳钢的分类、钢号与应用范围	66	四、实验步骤	106
一、碳钢的分类	66	五、实验报告要求 (格式可由学生自行设 计)	107
二、碳素结构钢	67	思考题与练习题	107
三、碳素工具钢	68	第八章 合金钢	110
四、铸造碳钢	70	§ 8-1 合金钢的分类与编号	110
思考题与练习题	71	一、合金钢的分类	110
第七章 钢的热处理	72	二、合金钢的编号	110
		§ 8-2 合金元素在钢中的作用	111
		一、合金元素与铁的作用	111

二、合金元素与碳的作用	111	一、球墨铸铁的成分、组织和性能	152
三、合金元素对铁碳合金状态图的影响	112	二、球墨铸铁的牌号 and 用途	154
四、合金元素对钢热处理组织转变的影响	113	三、球墨铸铁的热处理	154
§ 8-3 合金结构钢	115	§ 9-7 合金铸钢简介	155
一、普通低合金结构钢 (简称普低钢)	115	一、耐磨铸铁	155
二、合金渗碳钢	116	二、耐热铸铁	155
三、合金调质钢	118	三、耐蚀铸铁	157
四、合金弹簧钢	120	§ 9-8 实验四 常见铸铁组织的观察	157
五、滚动轴承钢	122	一、实验目的	157
六、其它结构钢	125	二、概述	158
§ 8-4 合金工具钢	128	三、实验设备及材料	158
一、合金刀具钢	129	四、实验内容	158
二、合金模具钢	131	五、实验报告要求	159
三、量具钢	137	思考题与练习题	159
§ 8-5 特殊性能钢	137	第十章 非铁金属及其合金	160
一、不锈钢	137	§ 10-1 铝及铝合金	160
二、耐热钢	138	一、纯铝的性质、代号和用途	160
三、耐磨钢	140	二、铝合金的分类	160
§ 8-6 课堂讨论合金钢	141	三、铝合金的热处理——淬火与时效	161
一、讨论目的	141	四、形变铝合金	162
二、讨论题	141	五、铸造铝合金	165
三、讨论方法 (仅供参考)	141	§ 10-2 铜及铜合金	166
思考题与练习题	142	一、纯铜	166
第九章 铸铁	143	二、铜合金	166
§ 9-1 概述	143	§ 10-3 滑动轴承合金	171
一、铸铁的特点	143	一、对轴承合金性能和组织的要求	171
二、铸铁的分类	143	二、轴承合金的组织	172
§ 9-2 铸铁的石墨化及其影响因素	144	三、常用的轴承合金	172
一、铁碳合金双重量状态图	144	思考题与练习题	175
二、石墨化过程	145	第十一章 粉末冶金材料	176
三、影响石墨化的因素	145	§ 11-1 概述	176
§ 9-3 灰铸铁	146	一、粉末冶金工艺简介	176
一、灰铸铁的成分、组织和性能	146	二、粉末冶金的特点与应用	176
二、灰铸铁的孕育处理	148	§ 11-2 粉末冶金减摩材料	177
三、灰铸铁的牌号和用途	148	一、含油轴承材料	177
四、灰铸铁的热处理	149	二、金属塑料减摩材料	178
§ 9-4 可锻铸铁	150	§ 11-3 粉末冶金铁基结构材料	178
一、可锻铸铁的成分、组织和性能	150	§ 11-4 硬质合金	179
二、可锻铸铁的牌号和用途	151	一、硬质合金的特点	179
§ 9-5 蠕墨铸铁	152	二、硬质合金的分类	179
§ 9-6 球墨铸铁	152	三、硬质合金的用途	180
		思考题与练习题	182

第十二章 非金属材料.....183	§ 13-2 零件和工具的失效方式..... 207
§ 12-1 高分子化合物的基本知识..... 183	一、变形失效..... 207
一、基本概念..... 183	二、断裂失效..... 207
二、高分子化合物的合成..... 184	三、表面损伤失效..... 208
三、高分子材料的分类与命名..... 185	§ 13-3 热处理的技术条件、工序位置和结 构工艺性..... 209
§ 12-2 工程塑料..... 186	一、热处理的技术条件..... 209
一、塑料的组成及分类..... 186	二、热处理工序的合理安排..... 211
二、工程塑料的性能..... 188	三、热处理零件的结构工艺性..... 212
三、常见工程塑料..... 188	四、热处理与切削加工性的关系..... 213
四、塑料的成型..... 191	§ 13-4 典型零件的选材及工艺分析..... 214
五、塑料制品的加工..... 192	一、齿轮..... 214
六、工程塑料的选用..... 193	二、轴类..... 216
§ 12-3 橡胶..... 195	§ 13-5 典型工具的选材及工艺分析..... 218
一、橡胶的组成..... 195	一、刀具——手用丝锥..... 218
二、橡胶的性能..... 196	二、模具——冷变形模具..... 219
三、常用橡胶及其性能..... 197	§ 13-6 习题课..... 222
§ 12-4 陶瓷..... 198	一、生产实例..... 222
一、陶瓷的性能..... 198	二、习题..... 226
二、常用陶瓷材料及其应用..... 199	思考题与练习题..... 226
§ 12-5 复合材料..... 200	附表..... 228
一、复合材料的分类..... 200	附表一 压痕直径与布氏硬度对照表..... 228
二、复合材料的性能..... 200	附表二 维氏硬度换算表(载荷5kgf)..... 232
三、常用复合材料及其应用..... 201	附表三 黑色金属硬度及强度换算表 (GB1172—74)..... 234
思考题与练习题..... 202	附表四 常用结构钢退火及正火工艺规范..... 237
第十三章 典型零件和工具的选材及工 艺路线分析..... 203	附表五 常用工具钢退火与正火工艺规范..... 238
§ 13-1 选用材料的一般原则..... 203	附表六 常用钢材回火温度与硬度对照表..... 239
一、材料的使用性能..... 203	附表七 国内外常用钢牌号对照表..... 240
二、材料的工艺性能..... 205	
三、材料的经济性..... 207	

结 论

一、我国材料工业发展概况

材料是人类用来制作各种产品的物质,是人类生产和生活的物质基础。人类社会的发展历史表明,生产中使用材料的情况,直接反映人类社会的文明水平。所以历史学家以石器时代、陶瓷时代、铜器时代和铁器时代来划分古代史各阶段。而今人类正跨入人工合成材料的新时代。

我国是世界上应用铜、铁最早的国家。根据对大量出土文物的考证,表明我国在公元前16世纪以前就开始使用金属材料。殷商时代,在生产工具、武器、生活用具及礼器等方面均使用大量青铜,如重达875kg的司母戊大鼎,不仅体积庞大,而且花纹精巧,造型美观,这说明了当时已具有高超的冶铸技术和艺术造诣。在春秋时期,发明了生铁冶炼技术,开始用铸铁作农具,这比欧洲国家早1800多年。青铜组成元素的六种配比的“六齐”规律,是世界上最早的合金工艺总结。早在2000年前,我国就采用了淬火、渗碳等热处理工艺。至于我国古代的陶瓷及天然高分子材料如丝绸,在世界文明史上更占有光辉的一页。

解放后,我国的材料工业迅速发展。钢铁年产量在解放初期只有15.8万t。塑料、合成橡胶等材料的生产和应用处于极端落后的状态。而目前钢铁年产量为6000多万t,不但能生产常用的碳钢,而且能生产种类繁多、性能各异的合金钢、工具钢、不锈钢、耐热钢、球墨铸铁、耐酸铸铁、钛合金等金属材料。截止到1988年,各种塑料的年产量达153万t,橡胶、陶瓷等非金属材料的产量也有了大幅度增长,并为国防尖端武器和发射人造地球卫星提供了特殊性能的新型材料。

二、工程材料在机械制造业中的作用与地位

材料的发展与国民经济的发展有密切的关系。从日常生活用具到高、精、尖的产品,从简单的手工工具到复杂的飞机、机器人,都是由不同种类、不同性能的工程材料加工成的零件组合装配而成。例如,我国依靠自己的力量,用自己生产的金属材料,建成了长江大桥,成功地发射了跨进世界先进行列的运载火箭和试验通信卫星,制造了相当数量的远洋巨轮、内燃机车、汽车、拖拉机、机床及各种机器设备。目前,我国已形成了产品门类基本齐全、分布合理的机械工业体系。机械产品不仅装配了国内各个生产部门,而且有相当数量的金属材料 and 机械产品远销世界许多国家。这些成就充分反映了工程材料在国民经济中的重要作用与地位。

各种材料的性能好坏直接影响到产品的质量、寿命和可靠性。现代工业装备向着高速、自动、精密等方向发展,没有恰当的材料就难以实现;要解决当前能源的紧张问题,其中关键问题之一是材料,如太阳能电池所用材料,用超导材料来减少输电线路中的损耗等。要提高经济效益亦与材料有关,如提高材料的利用率就能降低产品的成本,我国的4t载重汽车自重为3.8t,而国外先进的同类汽车仅为2.8t;提高材料性能(可通过更换新品种或各种热处理工艺改变内部组织来达到)不仅可降低成本,而且使产品的质量和寿命提高,如石油钻机钻头的寿命,我国仅是国外的1/3~1/5。

三、机械工程材料课的主要内容

机械工程材料课的内容主要由以下八个部分组成:

- (1) 金属的机械性能——介绍常用的机械性能指标及其测定方法。
- (2) 金属学的基础知识——介绍常用金属与合金的晶体结构及结晶过程,二元合金状态图(匀晶、共晶、共析);简化的铁碳合金状态图,运用铁碳合金状态图分析铁碳合金成分、组织与性能的关系以及在冷热加工中的应用。
- (3) 加工硬化与再结晶——介绍加工硬化与再结晶现象,及其对金属组织与性能的影响。
- (4) 钢的热处理——介绍钢在加热和冷却时的转变;转变产物的组织形态和性能。常用热处理方法(退火、正火、淬火、回火和化学热处理)的目的、工艺特点和应用。
- (5) 金属材料——介绍合金元素的作用,常用合金(碳钢、合金钢、铸铁、铝合金、铜合金、轴承合金、粉末冶金材料等)的种类、牌号、热处理、性能及用途。
- (6) 非金属材料——介绍常用工程塑料、橡胶、陶瓷、复合材料的性能和应用。
- (7) 典型零件与工具的材料选用及工艺路线分析——介绍选材的基本原则;零件与工具主要失效型式;根据零件或工具的使用性能、材料工艺性能以及经济性,合理选用材料和相应的热处理工艺。
- (8) 实验——金属的机械性能测定方法;金相试样的制备、正确使用金相显微镜、观察碳钢、铸铁等显微组织;热处理的基本操作。

由此可见,机械工程材料课是一门内容广泛、理论和实践相结合的课程。由于材料与热处理常成为机械产品质量的关键,因此,学习和掌握本课程对培养合格的机械制造类工程技术人员是很有必要的。

四、本课程的特点和学习方法

“机械工程材料”是机械制造专业必修的技术基础课。学习本课程时,在内容上既要注意理解基本概念和基本原理,又要注意掌握工艺特点,逐步熟悉常用技术名词、符号和材料牌号。在学习中,不仅要认真学习系统的理论知识,而且要重视室内讨论课、习题课、实验课等实践性教学环节。

室内讨论课是知识运用的很好方式,本教材将列入有关章节。学生可围绕着一定的问题,经过充分而认真的准备后,在教师的指导下,在课堂上各抒己见,相互启发,共同研究,取长补短,更好地掌握所学知识。

实验是培养学生观察、分析、动手的能力和获得一定实验技能的重要教学环节。为此学生必须认真阅读实验课内容,在教师和实验员指导下,自己动手做好实验,并写出实验报告。

课后要及时复习,认真完成教师布置的思考题与练习题。思考题偏重于基本概念,是学生阅读教材的引导;练习题偏重于综合运用,有些就是生产实际问题,它是培养学生将所学知识灵活运用,分析问题,解决问题和独立工作的能力。

本课程的实践性较强,必须在金工教学实习获得感性认识的基础上进行课堂教学,才能收到预期效果。课程中有些工艺知识,特别是结构工艺性等内容,尚需在有关后续课和课程设计、毕业设计中反复练习提高,才能较好的掌握和应用。

第一章 金属的机械性能

为了正确地使用金属材料,应充分了解和掌握材料的性能。金属的性能包括使用性能和工艺性能。使用性能是指为保证机械零件或工具正常工作,金属材料应具备的性能,包括机械性能、物理性能(如电学性能、磁学性能及热学性能等)、化学性能(如耐蚀性、抗氧化性等)。工艺性能是指在制造机械零件及工具的过程中,金属材料适应各种冷、热加工的性能,包括铸造性、可锻性、焊接性、热处理性和切削加工性等。

机械零件或工具在使用过程中,往往要受到各种载荷的作用,金属材料在载荷作用时反映出来的性能,称为机械性能(又称力学性能)。它是设计机械零件或工具时选择材料的重要依据。金属材料的机械性能主要有强度、塑性、硬度、冲击韧性、抗疲劳性等。

§ 1-1 强度和塑性

一、强度

金属材料的强度和塑性指标可以通过拉伸试验求得。

1. 拉伸试样

拉伸试样的形状通常有圆柱形和板状两类。在国家标准(GB228—76)中,对试样的形状、尺寸及加工要求均有规定。图1-1所示为圆柱形拉伸试样。

图中 d_0 为试样的直径。 l_0 为标距长度,是指试样计算时的有效长度。根据标距长度与直径之间的关系,试样可分为长试样($l_0 = 10d_0$)和短试样($l_0 = 5d_0$)。



图1-1 标准拉伸试样

2. 拉伸曲线

将试样安装在拉伸试验机的上下两个夹头内,缓慢地加载,随时记录载荷与变形量的数值,直至试样拉断为止。然后将记录的数值绘在以载荷为纵坐标,变形量为横坐标的图上,连接各点所得的曲线即为拉伸曲线。图1-2为低碳钢的拉伸曲线。

由图可见,低碳钢试样在拉伸过程中,其载荷与伸长量的关系有以下几个阶段。

当载荷不超过 F_p 时,拉伸曲线 OP 为一直线,即试样的伸长量与载荷成正比地增加,如果卸除载荷,试样立即恢复到原来的尺寸,故完全符合虎克定律,试样属于弹性变形阶段。

当载荷超过 F_p 后的一定范围,拉伸曲线开始偏离直线,即试样的伸长量不再与载荷成正比关系,但若卸除载荷,试样仍能恢复到原来的尺寸,故仍属于弹性变形阶段。

当载荷超过 F_s 后,试样将进一步伸长,但此时若卸除载荷,弹性变形消失,而另一部分变形却不能消失,即试样不能恢复到原来的尺寸,这种不能恢复的变形称为塑性变形或永久变形。

当载荷增加到 F_s 时,拉伸曲线在 s 点后出现一个平台,即表明在载荷不增加的情况

下, 试样却继续伸长, 这种现象称为屈服。

当载荷超过 F_s 后, 试样的伸长量与载荷又将成曲线关系上升, 但曲线的斜率比 op 段的斜率小, 即载荷的增加量不大, 而试样的伸长量却很大, 这表明在载荷超过 F_s 后, 试样已开始产生大量的塑性变形。当载荷继续增加到某一最大值 F_b 时, 试样的局部截面缩小, 产生了颈缩现象。由于试样局部截面的逐渐减少, 故载荷也逐渐降低, 当达到拉伸曲线上的 k 点时, 试样就被拉断。

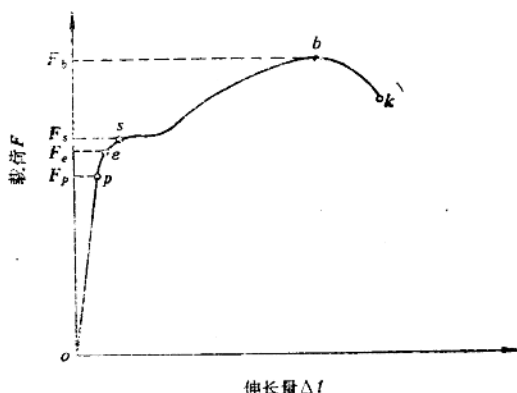


图1-2 低碳钢的拉伸曲线

3. 强度的衡量指标

根据拉伸曲线上各种特殊点的载荷与原截面积的关系, 可以测定材料的强度指标。强度是指金属材料在载荷作用下, 抵抗塑性变形和断裂的能力。

当金属材料受载荷作用而未引起破坏时, 其内部产生与载荷相平衡的内力, 材料单位横截面上的内力称为应力。强度高低是以金属材料所能承受的应力数值大小来表示的。

(1) 弹性极限 金属材料在载荷作用下产生弹性变形时所能承受的最大应力称为弹性极限, 用符号 σ_e 表示:

$$\sigma_e = \frac{F_s}{A_0}$$

式中 F_s ——试样产生弹性变形时所承受的最大载荷;

A_0 ——试样原始横截面积。

弹性极限是表示微量塑性变形的抗力, 或者说是开始产生塑性变形的抗力。有些零件, 如精密弹簧、枪炮管等, 在工作中不允许产生微量的塑性变形, 设计时应根据弹性极限来作为选材的依据。

(2) 屈服强度 金属材料开始产生屈服现象时的最低应力称为屈服强度, 用符号 σ_s 表示

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0}$$

式中 F_s ——试样屈服时的载荷;

A_0 ——试样原始横截面积。

工业上使用的某些金属材料, 如高碳钢、铸铁等, 在拉伸试验中不出现明显的屈服现象。所以国标中规定, 以试样塑性变形量为试样标距长度的 0.2% 时, 材料承受的应力称为“条件屈服强度”, 并以符号 $\sigma_{0.2}$ 表示。 $\sigma_{0.2}$ 的确定方法如图 1-3 所示: 在拉伸曲线横坐标上截取 c 点, 使 $oc = 0.2\% l_0$, 过 c 点作 op 斜线的平行线, 交曲线于 s 点, 则可找出相应的载荷 $F_{0.2}$, 从而计算出 $\sigma_{0.2}$ 。

屈服强度代表金属材料发生明显塑性变形的抗力。绝大多数机器零件, 如紧固螺栓等,

在工作中都不允许产生明显塑性变形。因此屈服强度是设计和选材的主要依据之一。

(3) 抗拉强度(又称强度极限) 金属材料在断裂前所能承受的最大应力称为抗拉强度, 用符号 σ_b 表示:

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0}$$

式中 F_b ——试样在断裂前的最大载荷;

A_0 ——试样原始横截面积。

零件设计时不允许产生过量塑性变形, 常用 σ_s 作为设计依据。脆性材料没有屈服现象, 则用 σ_b 作为设计依据。

二、塑性

金属材料在载荷作用下, 产生永久变形而不破坏的性能称为塑性。常用的塑性指标有延伸率(δ)和断面收缩率(ψ)。

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

式中 l_0 ——试样原标距长度;

l_1 ——试样拉断后的标距长度;

A_0 ——试样原始横截面积;

A_1 ——试样拉断后细颈处横截面积。

δ 的大小与试样的尺寸因素有关。 δ_{10} 、 δ_5 分别表示用长试样和短试样试验后计算的延伸率。对于同一材料, 用短试样测得的延伸率大于长试样的延伸率, 即 $\delta_5 > \delta_{10}$ 。因此, 在比较不同材料的延伸率时, 应采用同样尺寸规格的试样。而 ψ 与试样的尺寸因素无关。对于由于材料质量引起的塑性改变, ψ 比 δ 反应敏感。例如, 在大型锻件表面和内部分别取样, 往往 ψ 的差异较明显, 而 δ 变化不大。所以, ψ 能更可靠地代表金属材料的塑性。

金属材料的塑性好坏, 对零件的加工和使用都具有重要的实际意义。塑性好的材料不仅能顺利地进行锻压、轧制等成型工艺, 而且在使用时万一超载, 由于塑性变形, 能避免突然断裂。所以, 大多数机械零件除要求具有较高强度外, 还必须有一定的塑性。延伸率 $\delta = 5\%$ 、断面收缩率 $\psi = 10\%$ 的数值, 即可满足使用要求。一般认为, 机械零件在保证一定的强度要求前提下, 塑性好, 零件工作就安全可靠。

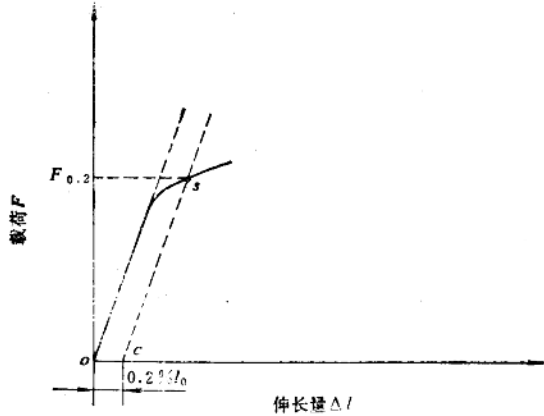


图1-3 条件屈服强度的测定

§ 1-2 硬 度

硬度是金属材料抵抗更硬物体压入的能力, 即抵抗局部塑性变形的能力。

硬度测定常用压入法: 把一定的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。根据压头和压力的不同，常用的硬度指标有布氏硬度（HBS 或 HBW）、洛氏硬度（HRA、HBB、HRC）和维氏硬度（HV）。

一、布氏硬度

布氏硬度试验原理如图 1-4 所示：用直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球，以相应的载荷 F 压入试样表面，保持规定的时间后卸除载荷，在试样表面留下球形压痕。布氏硬度的值是载荷除以压痕球形表面积（ $A_{\text{球}}$ ）所得的商：

$$\text{布氏硬度} = \frac{F}{A_{\text{球}}} = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

在布氏硬度试验中，载荷 F 的单位取 kgf ①，钢球直径 D 与压痕直径 d 的单位为 mm ，因此布氏硬度的单位为 kgf/mm^2 ，但习惯上只写明硬度的数值而不标出单位。

在进行布氏硬度试验时，钢球直径 D 、施加的载荷 F 和载荷保持时间，应根据被测试金属的种类和试样厚度，按表 1-1 所示的布氏硬度试验规范正地进行选择。

表 1-1 布氏硬度试验规范

材 料	硬度范围 HBS	试样厚度 mm	$\frac{F}{D^2} / (\text{kgf} \cdot \text{mm}^{-2})$	钢球直径 D mm	载 荷 F kgf	载荷保持时间 s
黑色金属	140~450	6~3	30	10	3000	10
		4~2		5	750	
		<2		2.5	187.5	
	<140	>6	10	10	1000	10
		6~3		5	250	
		<3		2.5	62.5	
铜合金及镁合金	36~130	>6	10	10	1000	30
		6~3		5	250	
		<3		2.5	62.5	
铝合金及 轴承合金	8~35	>6	2.5	10	250	60
		6~3		5	62.5	
		<3		2.5	15.6	

由布氏硬度值的计算公式可以看出，当所加载荷 F 与钢球直径 D 已选定时，硬度值 HBS（或 HBW）只与压痕直径有关。 d 愈大，则 HBS（HBW）值愈小；反之， d 愈小，HBS（HBW）值愈大。在实际测试时，硬度值不需要用上述公式计算，一般用刻度放大镜测出压痕直径 d ，然后根据 d 大小查本书附表一，即可求得所测的硬度值。

除了采用钢球直径 D 为 10mm，载荷 F 为 3000kgf，保持时间为 10s 的试验条件外，在其它试验条件下测得的硬度值，应在符号 HBS 的右下角用相应数字注明钢球直径、载荷大小和载荷保持时间。如 120HBS_{10/1000/30}，即表示用 10

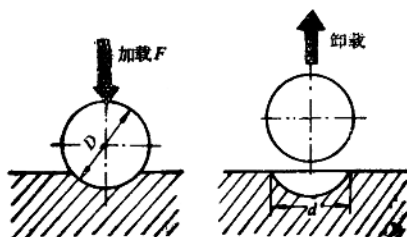


图 1-4 布氏硬度试验原理图

① 载荷的法定计量单位应为 N，但硬度试验机上所加载荷的单位为 kgf，为便于应用硬度数据，此单位仍沿用。
1 kgf = 9.8 N。

mm 的钢球, 在 1000kgf 的载荷作用下保持 30 s 后所测得的硬度值为 120。

淬火钢球用于测定硬度 HBS < 450 的金属材料, 如灰铸铁、有色金属及经退火、正火和调质处理的钢材等。为了避免压头变形, 可用硬质合金球压头, 它适用于 HBW < 650 的金属材料。我国目前布氏硬度试验机的压头主要是淬火钢球。

布氏硬度试验机的优点是: 试验时使用的钢球直径较大, 在金属材料表面上留下压痕也较大, 测得的硬度值也较准确; 此外, 因为布氏硬度值是由塑性变形抗力决定的, 塑性变形抗力愈高, 材料 σ_s 愈高, 硬度值也愈高。HBS 值与 σ_s 之间在一定条件下存在一定的关系, 可近似换算, 其经验换算关系如下^①:

钢 布氏硬度 HBS > 175 时 $\sigma_s \approx 3.62 \text{HBS}$

布氏硬度 HBS < 175 时 $\sigma_s \approx 3.45 \text{HBS}$

灰铸铁 $\sigma_b \approx \frac{5(\text{HBS} - 40)}{3}$

二、洛氏硬度

洛氏硬度试验原理如图 1-5 所示: 它是以一定尺寸的淬火钢球或以顶角为 120° 的金刚石圆锥压头压入试样表面。试验时, 先加初载荷, 然后加主载荷。压入试样表面之后, 卸除主载荷, 在保留初载荷的情况下, 根据试样表面压痕深度, 确定被测金属的洛氏硬度值。

图 1-5 中, 0-0 为金刚石压头还没有和试样接触的位置。1-1 是在初载荷作用下, 压头所处的位置, 压入深度为 h_1 , 目的是为了消除由于试样表面不光洁而对试验结果的精确性造成的不良影响。图中 2-2 为总载荷 (初载荷 + 主载荷) 作用下压头所处的位置, 压入深度为 h_2 。3-3 是卸除主载荷后压头所处的位置, 由于金属弹性变形得到恢复, 此时压头实际压入深度为 h_3 。故由于主载荷所引起的塑性变形而使压头压入深度 $h = h_3 - h_1$ 。洛氏硬度值就由 h 的大小来确定, 压入深度 h 越大, 硬度越低; 反之, 则硬度越高。为了照顾习惯上数值愈大, 硬度愈高的概念, 故采用一个常数 C 减去 h 来表示硬度大小, 并用每 0.002mm 的压痕深度为一个硬度单位。由此获得的硬度值称为洛氏硬度值, 用符号 HR 表示。因此

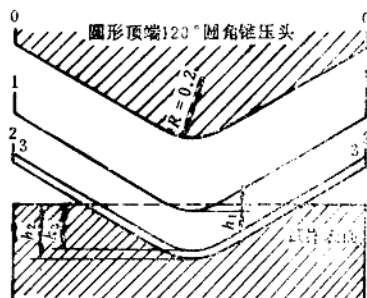


图1-5 洛氏硬度试验原理图

(R 的单位为 mm)

$$\text{HR} = C - \frac{h}{0.002 \text{mm}}$$

式中, C 为常数 (对于 HRC, C 为 130; 对于 HRB 和 HRA, C 为 100), 由此获得的洛氏硬度值 HR 为一无名数, 在试验时一般由指示器上直接读出。

为了能用一种硬度计测定较大范围的硬度, 常用洛氏硬度采用了三种硬度标度, 其试验条件及应用范围见表 1-2。

洛氏硬度试验的优点是操作简便迅速, 效率高, 直接从表盘读出硬度值, 且压痕小, 故可直接测量成品或较薄工件的硬度; 对于 HRA 和 HRC 采用金刚石压头, 故可测量高硬度

① 此处 HBS 为硬度计实测值, σ_s 的单位取 N/mm^2 。

表1-2 常用洛氏硬度标度的试验范围及应用

标 尺	压 头 类 型	总载荷/kgf	硬度值有效范围	应 用
HRA	120°金刚石圆锥体	60	70~85	适用测量硬质合金、表面淬火层或渗碳层
HRB	(1/16)"($\phi 1.588\text{mm}$)钢球	100	25~100	适用测量有色金属、退火、正火钢等
HRC	120°金刚石圆锥体	150	20~67	适用淬火钢、调质钢等

的材料。其缺点是由于压痕较小，测得的数值不够准确，通常应在试样不同部位测定三次，取其平均值为该材料的硬度值。

三、维氏硬度

布氏硬度试验不适用于测定硬度较高的材料，洛氏硬度试验可用于测定软材料和硬材料，但不同级别的硬度值不能直接比较。为了测量从软到硬的各种材料，并有连续一致的硬度标尺，特制定了维氏硬度试验法。

维氏硬度试验原理和布氏硬度相似，也是根据压痕单位面积上的载荷大小来计算硬度值，将一个相对面夹角为136°的正四棱面锥体金刚石压头以一定载荷压入试样表面，按规定保持一定时间后卸除载荷，测量压痕两对角线长度，如图1-6所示。

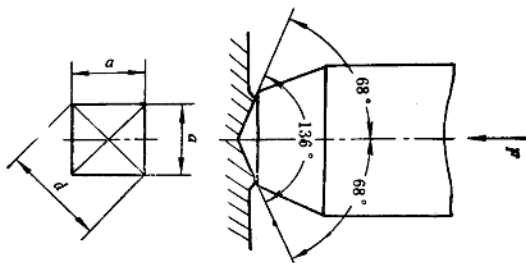


图1-6 维氏硬度试验原理图

维氏硬度值是载荷除以压痕表面积所得的商，用符号HV表示。因此，

$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 1.8544 \frac{F}{d^2}$$

式中 F ——作用在压头上的载荷；

d ——压痕两对角线长度 d_1 和 d_2 的算术平均值。

HV值的单位为 kgf/mm^2 ，但习惯上只写出其硬度数值而不标出单位。

维氏硬度常用的载荷有5、10、20、30、50及100kgf等几种。具体载荷大小，则根据试样大小、厚薄和渗层深度等条件选择。

维氏硬度适用范围宽，从极软的材料到极硬的材料都可以测量，尤其适用于表面层，如化学热处理的渗层硬度测量，其结果精确可靠。但其硬度值需要测量对角线的长度，然后计算或查表（一般是用装在机体上的测量显微镜测出压痕投影的两对角线的平均值 d ，然后根据 d 大小查本书附表二，求得所测的硬度值），其效率不如洛氏硬度试验法高。

§1-3 冲击韧性

前面讨论的都是缓慢加载条件下测得的指标。可是有些零件，例如发动机的曲轴、锻锤的锤杆、冲床的冲头等，在工作过程中受到的是冲击载荷，所以缓慢加载测得的性能指标，不适用于受冲击载荷的零件。因此要制定冲击载荷下测试的性能指标，即冲击韧性。

金属材料在冲击载荷作用下抵抗破坏的能力称为冲击韧性。为了评定金属材料的冲击韧性，需进行冲击试验。

一、摆锤式一次冲击试验

1. 冲击试验原理

一次冲击试验通常是在摆锤式冲击试验机上进行。试验时将带有缺口的试样安放在试验机的机架上，使试样的缺口位于两支座中间，并背向摆锤的冲击方向，如图 1-7 所示。

摆锤从一定的高度落下，将试样冲断。冲断试样时，在试样横截面的单位面积上所消耗的功，称为冲击韧性值，用符号 a_K 表示，单位为 J/cm^2 ，即

$$a_K = \frac{A_K}{A} = \frac{G(h_0 - h)}{A}$$

式中 A_K ——冲击功；

A ——试样断口处的横截面积；

G ——摆锤的重力；

h_0 ——冲断前摆锤的高度；

h ——冲断后摆锤的高度。

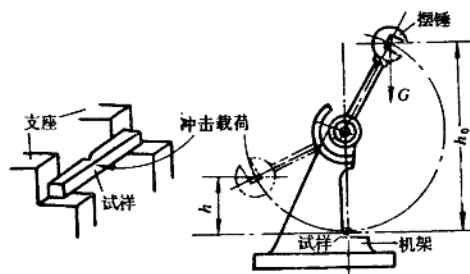


图1-7 摆锤式一次冲击试验原理图

试验时，冲击功 A_K 值可从试验机的刻度盘上直接读出， A_K 值大小就代表了材料韧性的 高低。而 a_K 值的大小，不仅决定于材料本身，同时还随试样尺寸、形状的改变及试验温度的不同而变化，因而 a_K 值只是一个相对指标。目前国际上许多国家直接采用冲击功 A_K 作冲击韧性的指标。

a_K 或 A_K 值对材料的一些缺陷很敏感，能灵敏地反映出材料的品质、宏观缺陷和显微组织方面的微小变化，因而是生产上检验用冶炼、热加工、热处理工艺得到的半成品和成品质量的有效方法之一。

2. 冲击试样

为了使试验结果能相互比较，必须采用标准试样。GB229—83规定，以梅氏试样为冲击韧性试验的标准试样。其形状、尺寸和加工表面粗糙度如图 1-8 所示。如有关技术条件和双方协议另有规定时，也可采用某些非标准试样。但需注意，不同类型试样所获得的冲击韧性值不能相互换算和直接比较。

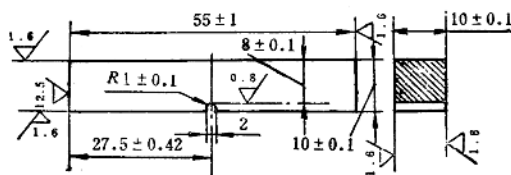


图1-8 梅氏试样

3. 温度对冲击韧性值的影响

冲击韧性值与试验的温度有关。有些材料在室温 $20^\circ C$ 左右试验时并不显示脆性，而在较低温度下，则可能发生脆断。温度对冲击韧性值的影响如图 1-9 所示。由图可以看出，冲击韧性值随着试验温度的下降而降低。材料在低于某一温度时， a_K 值显著下降呈脆性，这一温度称为脆性转变温度。在脆性转变温度以下，材料由韧性状态变为脆性状态。材料的脆性转变温度越低，说明低温冲击性能越好。普通碳素钢的脆性转变温度大约是 $-20^\circ C$ ，这就是为什么某些车辆、桥梁、输送管道等在东北地区易发生脆断的原因所在。

二、多次冲击试验的概念

上述冲击韧性值是在大能量一次冲击条件下测得的性能指标。但是许多零件的工作条件是经受小能量多次冲击， α_K 值不能代表这些零件或材料的性能指标。因此，提出了小能量多次冲击试验。

图1-10为多次冲击弯曲试验示意图。试验时将试样放在试验机支座上，使试样受到试验机锤头的小能量多次冲击。测定被测材料在一定冲击能量下，开始出现裂纹和最后破裂的冲击次数，作为多次冲击抗力指标。

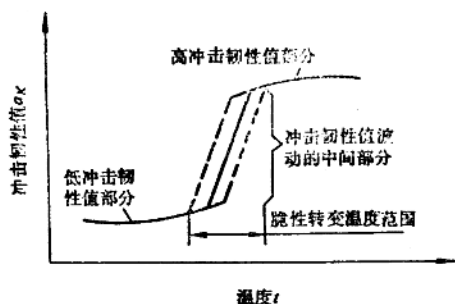


图1-9 温度对冲击韧性值的影响

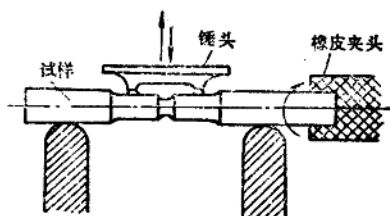


图1-10 多次冲击弯曲试验示意图

研究结果表明：多次冲击抗力取决于强度和塑性的综合性能指标。当冲击能量大时，材料的多次冲击抗力主要决定于塑性；冲击能量小时，则主要决定于强度。

§1-4 疲劳的概念

许多机械零件，如内燃机曲轴、齿轮、弹簧、连杆等，在工作中所受的是交变应力。所谓交变应力，是指应力的方向、大小随时间作周期性的变化。例如，某些轴类零件在旋转时，其表面反复经受拉和压，属于对称循环交变应力，如图1-11所示。虽然零件中的交变应力数值低于材料的屈服强度，但在长时间运转后也会发生断裂；这种现象称为疲劳断裂。据统计，机械零件断裂中，有80%是由于疲劳引起的，疲劳断裂的过程，往往是在零件的表面，有时也可能在零件的内部某一薄弱部位产生裂纹，随着应力的交变，裂纹不断向截面深处扩展，以致在某一时刻，使未裂的截面面积承受不了所受的应力时，便产生突然断裂。

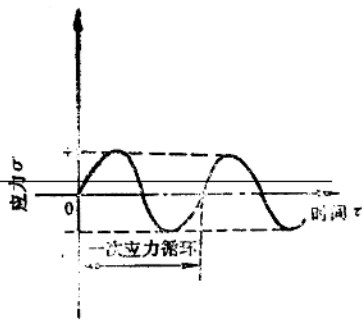


图1-11 对称循环交变应力

为了防止断裂，零件设计不能以 σ_s 、 $\sigma_{0.2}$ 为依据，必须制定疲劳抗力指标。疲劳抗力指标是由疲劳试验测得的。测得材料所受的交变应力 σ 与其断裂前应力循环次数 N 的关系曲线称为疲劳曲线，如图1-12所示。从曲线可以看出：应力 σ 愈低，则在断裂前能够承受的循环次数愈多；当应力降低到某一数值时，疲劳曲线与横坐标平行，即表示材料可经受无数次应力循环而不发生疲劳断裂。工程上规定，材料经受相当循环次数（对钢铁 $N=10^7$ 次，对非铁金属 $N=10^8$ 次）不