

目 录

前言

第一章 工程材料的性能1

第一节 工程材料的物理性能1

第二节 工程材料的力学性能3

一、机械零件的受力与变形3

二、强度4

三、塑性6

四、冲击韧度7

五、刚度7

六、硬度8

复习题10

第二章 金属和合金的结构与结晶11

第一节 金属的结构11

一、晶体和非晶体11

二、金属的晶体结构11

三、实际金属的结构12

第二节 金属的结晶13

一、冷却曲线及过冷度13

二、金属的结晶过程14

三、细化晶粒的方法15

第三节 合金的结构15

一、合金和相的概念15

二、合金中相结构的基本类型16

第四节 二元合金相图17

一、匀晶相图17

二、共晶相图17

三、具有极限溶解度相图18

复习题19

第三章 Fe-Fe₃C相图、碳钢和铸铁20

第一节 Fe-Fe₃C相图20

一、纯铁的同素异构转变20

二、铁碳合金的基本组织20

三、Fe-Fe₃C相图分析21

四、含碳量对钢组织和性能的影响23

第二节 碳钢24

一、杂质对钢性能的影响24

二、碳钢的分类24

三、碳素结构钢25

四、碳素工具钢28

第三节 铸铁30

一、铸铁的分类和石墨化30

二、灰铸铁31

三、球墨铸铁33

四、可锻铸铁34

五、蠕墨铸铁35

复习题36

第四章 金属材料的热处理37

第一节 钢的热处理原理37

一、钢在加热时的组织转变37

二、钢在冷却时的转变38

第二节 钢的退火与正火42

一、退火42

二、正火43

第三节 钢的淬火与回火43

一、钢的淬火43

二、钢的回火47

第四节 表面热处理49

一、表面淬火49

二、化学热处理51

复习题53

第五章 合金钢与合金铸铁54

第一节 合金钢54

一、合金钢的分类54

二、合金钢的牌号54

三、合金元素在钢中的作用55

四、合金结构钢55

五、工具钢59

六、具有特殊性能的合金钢65

第二节 合金铸铁66

一、耐热铸铁66

二、耐磨铸铁67

三、耐蚀铸铁67

复习题	68	第三节 陶瓷材料	110
第六章 有色金属	69	一、陶瓷的分类、特点和生产过程	110
第一节 铝及其合金	69	二、常用陶瓷	111
一、工业纯铝	69	复习题	112
二、铝合金的分类及热处理	69	第十章 铸造	113
三、变形铝合金	71	第一节 砂型铸造	113
四、铸造铝合金	73	一、型砂和芯砂	113
第二节 铜及其合金	75	二、造型与造芯	115
一、工业纯铜	75	三、模样制造	117
二、黄铜	75	四、铸造工艺的制定	117
三、青铜	77	第二节 特种铸造	120
第三节 滑动轴承合金	79	一、熔模铸造	121
一、轴承合金性能的要求	79	二、金属型铸造	122
二、轴承合金的组织	80	三、压力铸造	123
三、常用的轴承合金	80	四、低压铸造	124
复习题	82	五、离心铸造	125
第七章 粉末冶金与硬质合金	83	第三节 常用合金铸件的生产	126
第一节 粉末冶金	83	一、合金的铸造性能	126
一、粉末冶金的生产工艺	83	二、铸铁件的生产	129
二、常用的粉末冶金材料	85	三、铸钢件的生产	133
第二节 硬质合金	86	四、有色合金铸件的生产	134
一、硬质合金的性能特点	86	第四节 铸件结构设计	135
二、常用的硬质合金	87	一、铸造工艺对铸件结构的要求	135
复习题	88	二、合金的铸造性能对铸件结构的要求	137
第八章 材料的腐蚀与保护	89	三、运输及后续加工对铸件结构的要求	139
第一节 金属材料的腐蚀	89	四、特种铸造方法对铸件结构的要求	140
一、金属材料腐蚀的基本知识	89	复习题	142
二、金属材料防腐蚀的基本方法	91	第十一章 金属压力加工	143
第二节 陶瓷和塑料的腐蚀	95	第一节 金属的塑性变形	143
一、大气腐蚀	95	一、单晶体的塑性变形	143
二、水腐蚀	95	二、多晶体的塑性变形	144
三、化学介质腐蚀	95	三、塑性变形对金属组织和性能的影响	144
复习题	95	四、回复与再结晶	145
第九章 非金属材料	96	五、金属的热加工、冷加工和温加工	145
第一节 高分子材料	96	六、金属压力加工的方法及原理	146
一、高分子材料的基本知识	96	第二节 锻造	147
二、工程塑料	98	一、金属的可锻性	147
三、橡胶	103	二、自由锻	148
四、胶粘剂	106	三、模锻	154
第二节 复合材料	108	四、胎模锻	158
一、复合材料的分类和特点	108	第三节 冲压	160
二、纤维增强复合材料	108	一、冲压的特点和应用	160
三、夹层增强复合材料	110		

二、冲压的基本工序	160	一、齿轮类零件	217
三、冲模	163	二、轴类零件	219
四、冲压件的结构工艺性	165	三、箱体类零件	220
第四节 压力加工新工艺	166	第五节 毛坯的质量检验	220
一、回转锻造	166	一、外观检查	220
二、精密模锻	167	二、致密性检验	221
三、高速锤锻造	168	三、无损探伤	221
四、粉末锻造	168	第六节 使用材料应注意的问题	223
五、挤压	168	复习题	225
复习题	170	第十四章 金属试验和热处理实习	226
第十二章 焊接	171	第一节 金属试验	226
第一节 熔焊	172	一、金相试验	226
一、电弧焊	172	二、硬度试验	231
二、其它熔焊	183	三、现场试验	234
三、焊接热过程对焊接质量的影响	186	四、热处理实验	238
第二节 压焊与钎焊	191	第二节 热处理车间实习	240
一、压焊	191	一、热处理车间主要设备简介	240
二、钎焊	193	二、主要设备的操作和注意事项	244
第三节 常用金属的焊接	194	三、实习内容及时间分配	246
一、金属材料的焊接性	194	四、总结与考核	246
二、碳钢的焊接	194	五、参观实习思考题	247
三、合金钢的焊接	195	第十五章 铸造实习	248
四、铸铁的补焊	196	第一节 铸造生产工艺过程	248
五、有色金属的焊接	196	第二节 造型	248
第四节 焊件结构设计	198	一、铸型的组成	248
一、焊接结构材料的选择	198	二、手工造(修)型工具	248
二、焊接方法的选择	198	三、型砂的制备	250
三、焊缝设置及标注	199	四、造型方法	252
四、焊接接头形式设计	201	第三节 造芯	262
五、焊接结构设计举例	201	一、型芯的结构及其各部分的作用	262
复习题	203	二、芯砂的配制	263
第十三章 机械零件材料及毛坯的选择		三、造芯方法	264
与质量检验	205	第四节 模样及芯盒的制造	265
第一节 机械零件的失效	205	第五节 冲天炉熔炼铸铁的操作过程	268
一、失效的形式和引起失效的原因	205	第六节 浇注、落砂及清理	270
二、典型零件失效及其改正办法	209	一、浇注	270
第二节 机械零件材料及毛坯选择的一般		二、落砂	271
原则	212	三、清理	271
第三节 机械零件毛坯	214	四、铸件检验	272
一、机械零件常用毛坯	214	第七节 铸造生产实习指导	274
二、选用毛坯时应考虑的问题	215	一、实习计划安排	274
三、识别材料的现场试验	215	二、实际操作	274
第四节 典型零件选材及工艺流程	217	三、现场参观	278

第十六章 锻压实习	280	四、参观实习部分	301
第一节 锻造的生产过程	280	第十七章 焊接实习	303
一、锻造材料的准备	280	第一节 手工电弧焊	303
二、加热目的及其温度范围	280	一、手工电弧焊电源	303
三、锻造加热炉及其使用	281	二、手工电弧焊接工艺规范	305
四、加热产生的缺陷及其防止方法	282	三、手工电弧焊的操作	306
五、锻件的冷却	282	四、焊接缺陷产生的原因及其防止	308
第二节 自由锻造	283	五、焊接质量检验	309
一、自由锻造设备	283	六、安全操作常识	310
二、自由锻造的基本工序	284	第二节 气焊和气割	310
三、生产实习安全	290	一、设备构造及使用	310
四、典型自由锻造工艺举例	290	二、气焊工艺及操作特点	313
第三节 模锻	294	三、气割工艺	314
第四节 胎模锻造	295	四、气焊(割)安全操作常识	316
第五节 板料冲压	295	第三节 实习指导	316
一、冲压设备	295	一、实习内容及时间分配	316
二、板料冲压的基本工序	296	二、手工电弧焊部分	317
第六节 锻压生产实习指导	298	三、气焊、气割部分	319
一、实习目的	298	四、现场参观	321
二、实习内容及时间安排	298	参考文献	323
三、独立操作部分	299		

第一章 工程材料的性能

工程材料包括金属材料及非金属材料两大类，用于制造各种结构、机器、工具及日常用品等，在国民经济建设中起着重要作用。工程材料的性能一般分为使用性能和工艺性能。使用性能是反映材料在使用过程中所表现出来的特性，包括力学性能、物理和化学性能；工艺性能是反映材料在加工过程中所表现出来的特性，包括铸造性、压力加工性、焊接性、热处理性和切削加工性等。

使用性能是选用材料和决定零件尺寸的主要依据，而工艺性能则是确定零件加工方法的根据。只有全面了解材料的性能，才能合理地选择和正确地使用材料，生产出质量高、经久耐用的机器零件和机械设备。本章主要介绍工程材料的物理性能和力学性能。

第一节 工程材料的物理性能

物理性能是材料本身的属性，机械制造业中涉及的物理性能有密度、熔点、导电性、导热性、热膨胀性、磁性等。

1. 密度

单位体积的质量叫做密度 (kg/m^3)，与水密度的比叫相对密度。按相对密度大小，可以将金属分为轻金属（相对密度小于3.5）和重金属（相对密度大于3.5）。例如，铝、镁及其合金等属于轻金属；而铜、铅、锡及其合金等属于重金属。在机械制造业中，某些高速运转的零件以及轻便汽车、飞机、导弹、航天器等，常要求在满足强度要求的条件下尽量减轻质量，为此常采用铝合金、钛合金等制造。

非金属材料中，陶瓷的相对密度较大，塑料的相对密度较小。常用塑料聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯等的相对密度为0.9~1.1。

2. 熔点

材料缓慢加热时，由固态变为液态并有一定潜热吸收（或放出）时的温度叫做熔点。熔点不同的材料，在工业上有不同的用途。熔点低的金属，如锡、铅等可以用来制造钎料、保险丝、印刷铅字等；熔点高的金属，如铁、镍、铬、钴、钨等可以用来制造耐高温零件，如喷气飞机叶片、电阻丝等。

非金属材料中，塑料和一般玻璃没有熔点，只有软化点（或称玻璃化温度）。但陶瓷有熔点，例如石英 (SiO_2) 的熔点为1670℃，苦石 (MgO) 的熔点为2800℃，常用作耐火材料。

3. 导电性

材料传导电流的能力叫做导电性。用电导率 (S/m) 来判断材料导电性的好坏。电导率为表示材料通过电流难易程度的物理量，此值越大，导电性越好，常用材料的电导率如表1-1所列。从表1-1可知，金属具有良好的导电性，其中银最好，铜、铝次之。电导率大的材料电阻小，电导率小的材料电阻大。在电气工程上，采用电阻小的铜或铝做输电导体如导线、电缆等，以减少送电过程中的电能损失；采用电阻大的材料如铁铬铝合金、镍铬合金、硅碳

表1-1 常用工程材料的电导率

材 料	电 导 率 (S/m)	材 料	电 导 率 (S/m)
银(工业纯)	6.30×10^7	石 墨	1×10^5
铜(高电导率)	5.85×10^7	民用玻璃	$10^{-12} \sim 10^{-14}$
铝(工业纯)	3.50×10^7	光学玻璃	$10^{-10} \sim 10^{-13}$
工业纯铁	1.07×10^7	云 母	$10^{-11} \sim 10^{-15}$
密排不锈钢	0.14×10^7	聚乙烯	$10^{-15} \sim 10^{-17}$

棒等做电炉的加热元件。

4. 导热性

材料传导热量的能力叫做导热性。用热导率 ($W/(m \cdot K)$) 来判断材料导热性的好坏, 此值越大, 材料的导热性能越好。常用工程材料的热导率如表1-2所列。从表1-2可以看出, 纯金属导热性好, 而钢、合金导热性差。一般说来, 合金钢的导热性比碳钢差。

表1-2 常用工程材料在300K时热导率

材 料	热 导 率 ($W/(m \cdot K)$)	材 料	热 导 率 ($W/(m \cdot K)$)	材 料	热 导 率 ($W/(m \cdot K)$)
铝	0.53	碳(金刚石)	1.50	Ce70% + Zn30%	0.24
铜	0.93	铅	0.14	合 金	
铁	0.18	Ni70% + Cr30%	0.034	钢	0.12
银	1.00	合 金		玻 璃	0.0019

在加热金属时, 常常需要考虑金属的导热性。例如加热合金钢时加热速度应比碳钢慢, 以保证内外温度一致, 防止由于内外温差过大, 产生大的内应力而导致材料变形开裂。

导热性好的材料散热性也好, 在制造散热器、热交换器等零件时, 应选用这种材料。例如汽车前部的冷却水箱, 就是用铜制造的; 在制造不锈钢炊具时, 为了获得较好的导热性, 可用不锈钢夹低碳钢心的夹心板, 或用铜底连接不锈钢。

5. 热膨胀性

材料因温度的改变而引起体积膨胀或收缩, 这种热胀冷缩的现象叫做热膨胀性。可用线胀系数来表明不同材料的膨胀特性。温度上升 $1^{\circ}C$ 所引起的线度增加与它在 $0^{\circ}C$ 时的线度之比称为线胀系数 ($1/^{\circ}C$), 常用工程材料的线胀系数列于表1-3。

从表1-3可以看出, 因瓦合金和石英的线膨胀系数很小, 有很大的实用价值, 例如用来制造时钟的摆, 就可使时钟的快慢不大受温度变化的影响, 因瓦合金还用来制造精密量具。

金属的热膨胀性在机械制造中很重要, 有些情况需严加注意, 不可忽视, 以使结构或产品免遭破坏。当然, 在常温下工作的普通零件, 可以不予考虑。但对一些特殊零件, 如柴油

表1-3 常用工程材料的线膨胀系数

材 料	线胀系数 (1/°C)	材 料	线胀系数 (1/°C)
铝	0.000024	黄 铜	0.000019
铜	0.000004	银	0.000019
铁	0.000012	碳 钢	0.000011
因瓦(镍铁)合金	0.0000015	玻 璃	0.000004~0.000010
钢	0.000017	水 泥	0.000014
锡	0.000027	锌	0.000029
石英玻璃	0.0000005	生 铁	0.000010

机的活塞与气缸,因要求活塞在缸套内能自由往复运动,且要保证好的气密性,工作间隙很小,所以,要求活塞与缸套具有良好的导热性和相近的热膨胀性,以防止两者卡死或漏气。

另一方面,在机械制造中也常常利用金属的热膨胀现象。例如机械工人必须从钢套中取出青铜衬套,可借助加热取出,如图1-1所示。如果对衬套和套壳加热,在一定热量下,因青铜的膨胀速度几乎为钢的一倍,故钢限制青铜膨胀,这时它所受的应力可超过弹性极限而产生塑性变形,使冷却后,青铜衬套的外径小于钢套内径,自可轻易取出。又如火车轮箍的内径稍小于车轮的外径,对轮箍进行加热膨胀后,其内径大于车轮的外径,容易把车轮嵌进去。轮箍磨损后更换时,也是先把轮箍加热后再取下来。

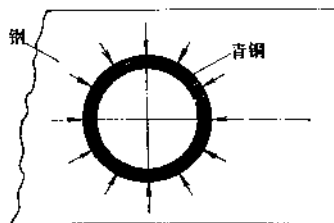


图1-1 利用金属热膨胀性松动青铜衬套

6. 磁性

材料能被磁化或被磁铁吸引的性能叫做磁性。磁性材料有金属和陶瓷两类。金属中的铁、镍、钴及其合金具有显著的磁性,称为金属磁性材料。陶瓷磁性材料通常称为铁氧体。当磁性材料加热到某一温度时,就会失去磁性,这个温度称为居里点。例如铁的居里点是770°C,镍的居里点是360°C。磁性材料又分为软磁材料和硬磁材料,前者容易磁化和去磁,后者难以磁化和去磁。

磁性材料对电机、变压器和电器元件特别重要。例如永久磁铁和电动机的磁芯可用硬磁材料钨钢或铬钢制造;变压器铁芯可用软磁材料硅钢或铁镍合金等制造;磁性陶瓷用于磁带录音机、电视机等,用在电冰箱门和小电动机的磁芯上时,可使设计大为简化。

第二节 工程材料的力学性能

一、机械零件的受力与变形

机械零件在使用过程中受到不同形式外力的作用,通常把这种外力称为载荷。根据载荷的性质,可将其分为静载荷和动载荷。

1. 静载荷

逐渐而缓慢地作用在零件上的力称为静载荷,如床头箱、尾架等对床身的压力,吊物对吊车钢索的拉力等。此外,作用在机器上的静载荷有弯矩、扭矩和剪力等,如图1-2所示。

2. 动载荷

动载荷有冲击载荷和交变载荷等。如空气锤头下落时锤杆所受的冲击力,是在一瞬间加上的,因此为冲击载荷。交变载荷是指载荷的大小和方向随时间而变化。如承载的曲轴、齿轮、连杆、弹簧等。在这种载荷作用下金属零件很易失效。

无论零件由何种材料制成,材料内部原子间都有相互平衡的原子力相互作用。当受外力作用时,原先的平衡受到破坏,材料中任何一个小单元和邻近各个小单元之间诱发了新的力,称为内力。材料单位截面上的内力,称为应力,用 σ 表示。

材料在载荷作用下引起的形状和尺寸改变,称为变形。去掉载荷后可恢复到原来形状和尺寸的变形称为弹性变形,而不能恢复到原来形状和尺寸的变形称为塑性变形。

材料的力学性能,是指材料承受上述不同载荷作用时所反映出来的行为和能能力,是衡量材料性能的极其重要的指标。材料的力学性能主要有强度、刚度、塑性、硬度、韧性。

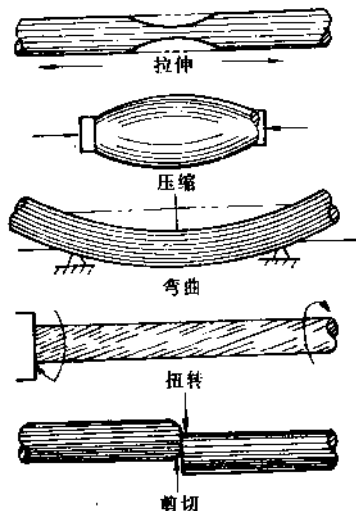


图1-2 作用在零件上的各种静载荷

二、强度

1. 拉伸试验强度指标

材料在载荷作用下抵抗塑性变形和断裂的能力称为强度。材料的强度越高,其所能承受的载荷就越大。按照载荷的性质,可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗扭强度、抗剪强度、疲劳强度等。工程上常用材料强度指标,是拉伸试验获得的抗拉强度、屈服点和弹性极限。

上述强度用拉伸试验机进行测定。进行材料的拉伸试验时,先制出标准拉伸试样(图1-3a),将其装夹在拉伸试验机上,缓慢地加载荷,使其不断产生变形,直到拉断试样为止。根据拉伸试验过程中载荷大小和对应的变形量关系,画出材料的拉伸曲线。一般拉伸试验机都具有自动记录装置,可以自动描绘出拉伸曲线。图1-4为低碳钢的拉伸曲线,图中纵坐标表

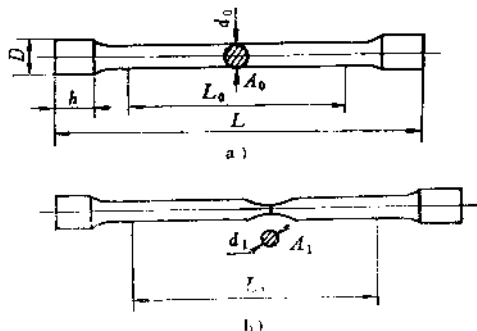


图1-3 钢的标准拉伸试样

a) 拉伸前 b) 拉伸后

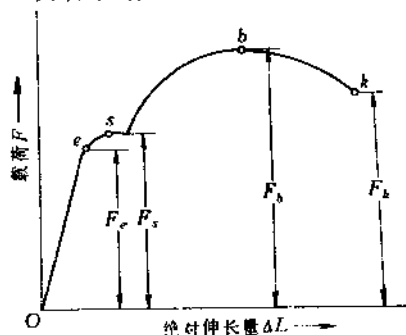


图1-4 低碳钢的拉伸曲线

示载荷 (F)，横坐标表示绝对伸长量 (ΔL)。

由图1-4可见，低碳钢试样在拉伸过程中载荷与变形量的关系是：①当载荷不超过 F_e 时，拉伸曲线 Oe 为一直线，即试样的伸长量与载荷成正比，卸载后试样能完全恢复到原来长度，属于弹性变形；②当载荷超过 F_e (过 e 点) 后，拉伸曲线开始偏离直线，试样的伸长量与载荷已不再成正比关系，卸载后试样不能恢复到原始长度，而保留一部分残留变形，即产生了塑性变形， F_e 称为弹性极限载荷；③当载荷增加到 F_s 时，拉伸曲线上出现了水平线段，这表明在载荷基本不变的情况下试样却继续变形，这种现象称为“屈服”，此时开始产生明显的塑性变形， F_s 是试样发生屈服时的载荷；④当载荷超过 F_s 后，随着载荷的增加试样开始产生大量的塑性均匀变形；增加到 F_b 时，试样某一部位截面便开始急剧缩小，产生所谓“缩颈”现象，由于局部截面缩小，故载荷也逐渐降低， F_b 是试样在断裂前所能承受的最大载荷；⑤当载荷到达 k 点时，试样随即断裂， F_k 为试样断裂时的载荷。综上所述，金属材料在外力作用下的变形可分为三个阶段，即弹性变形、弹塑变形和断裂。

(1) 弹性极限 材料能保持弹性变形时所能承受的最大应力，称为弹性极限，用 σ_e 表示，即

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0} \quad (\text{MPa})$$

式中 F_e ——弹性极限相应的载荷；

A_0 ——试样原始截面积。

弹性极限 σ_e 测量比较烦琐，而且需要十分精确的设备，故在手册中很少列出，只有在特殊需要时才测定。例如，为保证气缸体和缸盖的密封性，紧固螺栓不允许出现塑性变形，要求材料必须在应力小于 σ_e 的条件下工作，这时就要知道材料的 σ_e 。

(2) 屈服点 材料开始屈服时的应力，称为屈服点，用 σ_s 表示，即

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

式中 F_s ——材料发生屈服时的载荷；

A_0 ——试样原始截面积。

屈服点是压力加工时材料的最重要特性，因此必须测定各种材料的屈服点。但有些金属材料（如高碳钢、铸铁、黄铜）并没有明显的屈服现象发生，为表示这些材料的屈服点，规定试样产生 0.2% 塑性变形（伸长）量时的应力作为屈服点，称为条件屈服点，用 $\sigma_{0.2}$ 表示。这是因为对多数工程来说，允许的塑性变形为 0.2%。要求严格时也可规定 0.1% 或 0.05% 的塑性变形量。

屈服点 σ_s 是代表材料抵抗微量塑性变形的能力，而一般机器零件都是在弹性状态下工作的，不允许有微小的塑性变形发生，所以屈服点就成为零件设计时的主要依据。

(3) 抗拉强度 材料在断裂前所能承受的最大应力，称为抗拉强度，用 σ_b 表示，即

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0} \quad (\text{MPa})$$

式中 F_b ——试样在破坏前所能承受的最大载荷；

A_0 ——试样原始截面积。

抗拉强度 σ_b 代表材料抵抗大量均匀塑性变形的能力。抗拉强度测量较方便，而且数据也

较准确,所以进行零件设计时,可直接采用强度指标 σ_s ,但需使用较大的安全系数,它也是设计零件时的重要依据。

工程上所用的金属材料,不仅希望具有较高的 σ_s ,还希望具有一定的屈强比(σ_s/σ_b)。屈强比越小,结构零件的可靠性越高,万一超载时也能由于塑性变形而使金属的强度提高,不致立刻断裂。但如果屈强比太小,则材料的有效利用率过低,因此一般希望屈强比适当高一些。但为了使用安全,亦不宜过高。具体应用时,应综合考虑经济与安全两个因素。一般碳素钢的屈强比为0.6左右,低合金钢为0.65~0.75,合金结构钢为0.8左右。

塑料的抗拉强度也是通过拉伸试验测得的,如尼龙、丙烯酸、二乙醇、聚碳酸酯等,其抗拉强度可达62~69MPa。

2. 疲劳试验强度指标

许多机器零件,如各种轴、齿轮、连杆、弹簧等,都是在交变载荷作用下工作。交变载荷可以是大小交变、方向交变,或同时改变大小和方向。这种载荷常使金属材料在小于抗拉强度,甚至小于弹性极限的情况下,经多次循环后并无显著的塑性变形而突然断裂。这种现象叫做金属的疲劳。抵抗这种断裂的最大应力叫做疲劳强度。疲劳断裂与静载荷下的断裂不同,无论在静载荷下显示脆性或塑性的材料,疲劳断裂时事先都不产生明显的塑性变形,因此具有很大的危险性,常常造成严重事故。据统计,约有80%的零件失效是由于材料疲劳造成的。

疲劳断裂的出现是由于材料内部缺陷、表面伤痕等处在交变载荷作用下出现极微细的裂纹(称为疲劳裂纹),这种微裂纹再随应力循环次数的增加而逐渐扩展,从而使零件的有效截面不断减小,导致最后受不住外力的作用,在偶然的震动或冲击下便突然断裂。

机器零件在使用过程中不允许产生疲劳破坏,因此在交变载荷作用下工作的零件必须保证在无数次或相当多循环次数的交变载荷作用下不会断裂。金属材料在交变弯曲载荷下的疲劳强度,用符号 σ_{-1} 表示。疲劳强度由疲劳试验机试验确定。对于钢铁材料规定试验的循环周次为 10^7 次,而对有色金属及高合金钢规定为 10^8 次不引起断裂的应力,即为该材料的疲劳强度值。

金属材料的 σ_{-1} 与 σ_s 之间存在着一定的关系。碳素钢为 $\sigma_{-1} \approx (0.45 \sim 0.55)\sigma_s$;灰铸铁为 $\sigma_{-1} \approx 0.4\sigma_s$ 。可见,金属材料的疲劳强度随其抗拉强度的增高而增高。

三、塑性

材料在外力作用下发生塑性变形而不致破坏的能力叫塑性。评定材料塑性的指标是伸长率和断面收缩率。

1. 伸长率

试样在拉伸断裂后,总伸长量与原来长度比值的百分率,称为伸长率,以 δ 表示,即

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中 L_0 ——试样原始标距长度;

L_1 ——试样拉断后的标距长度。

2. 断面收缩率

试样拉伸断裂后,试样断口面积的缩减量与原截面面积比值的百分率,称为断面收缩率,以 ψ 表示,即

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

式中 A_0 ——试样原截面面积；

A_1 ——试样断口处截面积。

伸长率和断面收缩率的数值越大，表示金属材料的塑性越好，可以进行冲压或大变形量加工。此外，塑性好的金属材料不致因超过设计载荷而突然断裂，从而增加了安全可靠。

应当指出，塑性指标不能直接用于零件的设计计算，只能根据经验选定材料的塑性。对金属材料，一般来说伸长率达5%或断面收缩率达10%，即可满足绝大多数零件的要求。

热塑性塑料的伸长率是在软化温度或低于软化温度下试验获得的。热固性塑料在所有温度下伸长率都很低。

四、冲击韧度

材料抵抗冲击载荷作用而不致破坏的能力称为冲击韧度。许多机器零件在工作过程中往往受到冲击载荷的作用，如冲床的冲头、内燃机的活塞销与连杆、风动工具等。对于这种承受冲击载荷作用的零件，除需具有足够的强度指标外，尚需具有足够的冲击韧度。

材料在冲击载荷作用下断裂时，单位面积上所消耗的冲击吸收功称为冲击韧度，单位为 $J \cdot cm^{-2}$ 。此值越大，表示材料的韧性越好。金属材料冲击韧度的高低，可用摆锤式冲击试验机测定。

金属材料的冲击韧度除了与成分、组织、试样的形状、尺寸和表面粗糙度等因素有关外，还受到温度的影响。冲击韧度随温度的降低而减小，当试验温度降低到某一温度范围时，其冲击韧度急剧降低，这个温度范围称为冷脆转变温度范围。冷脆转变温度越低，材料的低温冲击性能就越好。这对于在寒冷地区作业的机械和工程结构的正常工作和运转，具有重要意义。

在工程上对承受不同载荷的零件，要求具有一定的 α_K 值，以保证使用安全，避免突然脆断。但 α_K 值不能直接用于零件的设计计算，只能根据实践经验确定。一般说来，在室温以下承受冲击的零件，其 α_K 值要高些。对一般零件，通常要求 $\alpha_K = 29 \sim 49 J \cdot cm^{-2}$ 。

塑料也采用冲击试验，这种材料在高速变形时易变脆，例如ABS塑料虽有20%~30%伸长率，但冲击韧度却较低。

五、刚度

材料在受力时抵抗弹性变形的能力称为刚度，它表示材料弹性变形的难易程度。在弹性变形阶段（图1-4），如果外力一样，则刚度越大，变形越小。

衡量材料刚度大小的指标是弹性模量 E 。 E 为弹性变形范围内应力与应变的比值。材料单位长度的变形量称为应变，即 $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ 。弹性模量可写成：

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

因此， E 值越大，材料在一定应力下产生的弹性变形越小。

一般机器零件在使用中皆处于弹性状态。对要求弹性变形小的零件，如柴油机曲轴、精密机床主轴，应选用 E 值较大的材料。不过对于具体零件的刚度，除决定于材料的 E 值外，还与零件断面形状和尺寸有关，如同一材料制造的两个零件， E 值虽然相同，但断面尺寸大

的不易发生变形,而断面尺寸小的易发生变形。

弹性模量还可用来计算零件加载时的弹性变形,例如一根曲轴在轴承之间呈一定弯曲,可借助弹性模量确定此弯曲量。此外,两种强度相同的材料,不能不考虑弹性模量而随便代替,因为弹性模量是不随强度而变化的。

在金属和陶瓷中,弹性模量相当稳定并与时间无关。但塑料的弹性模量总随时间和温度而急剧变化。而且即使同一种塑料,其弹性模量也可大不相同,例如高结晶度的聚乙烯的 E 值为818MPa,但具有分支的少量结晶态的聚乙烯的 E 值仅为172MPa,这些数值比金属和陶瓷小几百倍。因此用塑料去代替紧配合的金属时,必须认真考虑零件的偏斜。此外,热固性塑料比热塑性塑料的弹性模量高得多。一些金属的弹性模量如表1-4所列。

表1-4 常用金属材料的弹性模量

材 料	弹性模量 (MPa)	材 料	弹性模量 (MPa)
所有钢和合金钢	2.07×10^5	铝合金	0.45×10^5
		铸铁	$1.04 \sim 1.52 \times 10^5$
镍合金	$1.79 \sim 2.07 \times 10^5$	球墨铸铁	$1.52 \sim 1.73 \times 10^5$
铜合金	$1.03 \sim 1.24 \times 10^5$	可锻铸铁	$1.73 \sim 1.86 \times 10^5$
铝合金	$0.69 \sim 0.76 \times 10^5$	铝	3.24×10^5

六、硬度

硬度是材料的一种重要性质,但很难给一个统一定义,这是因为测量材料硬度的方法有许多种。一般测量金属材料的硬度常用压入法,因此硬度可定义为材料抵抗其它更硬物体压入其表面的能力。金属材料的硬度与强度指标有一定的近似关系(如低碳钢 $\sigma_s \approx 3.6\text{HB}$;高碳钢 $\sigma_s \approx 3.4\text{HB}$;调质合金钢 $\sigma_s \approx 3.25\text{HB}$;灰铸铁 $\sigma_s \approx 1\text{HB}$),而且硬度试验设备简单,操作方便、迅速,又不损坏零件,所以无论在生产上和科研中,应用都十分广泛。大多数零件设计图纸的技术条件,通常只标出所要求的硬度值,以综合体现所要求的力学性能。生产中应用较多的有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度。

1. 布氏硬度

布氏硬度试验法是用一直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球作为压头,在载荷 F 的作用下压入材料表面(图1-5),保持一定时间,然后卸除载荷,则在表面留下直径为 d 的球面压痕。以压痕面积除以载荷所得的商即做为硬度值,用符号HB表示。

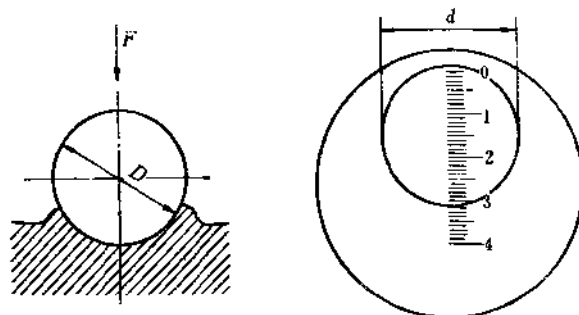


图1-5 布氏硬度试验原理和显微镜读数

$$\text{HB} = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi D h} = 0.102 \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中 F ——载荷 (N)；

D ——淬火钢球 (以 S 表示) 或硬质合金球 (以 W 表示) 直径 (mm)；

A ——压痕面积 (mm^2)；

h ——压痕深度 (mm)；

d ——压痕直径 (mm)。

由上式可知, 压头球体直径 D 和载荷 F 为已知数, 用目测显微镜测出球面压痕直径 d 后, 经计算或直接查表即可求得 HB 硬度值。布氏硬度有单位, 但习惯上一般不标出。

布氏硬度指标有 HBS 和 HBW 两种, 前者用淬火钢球, 适于测定布氏硬度值在 450 以下的软材料; 后者用硬质合金球, 适于测定布氏硬度值为 450~650 的硬材料。在进行布氏硬度试验时, 应按表 1-5 来选择压头直径 D 、载荷 F 和载荷保持时间。

布氏硬度试验法的优点是测定的数据准确、稳定, 数据重复性强。常用于测定退火、正火或调质钢、铸铁及有色金属的硬度。其缺点是压痕较大, 易损坏成品的表面, 不能测定太薄的试样。

表1-5 布氏硬度试验规范

金 属 种 类		布氏硬度值 范 围 (HBS)	试样厚度 (mm)	钢球直径 D (mm)	载 荷 F (N)	载荷保持时间 (s)
黑色金属	如: 退火、正火、调质状态的中碳钢和高碳钢、灰铸铁等	140~450	6~3 4~2 <2	10.0 5.0 2.5	29420 7355 1839	10
	如: 退火状态的低碳钢, 工业纯铁等	<140	>6 4~2 >2	10.0 5.0 2.5	9807 2452 612.9	10
有色金属	如: 特殊青铜、钛及钛合金等	>130	6~3 4~2 <2	10.0 5.0 2.5	29420 7355 1839	30
	如: 铜、黄铜、青铜、镁合金等	36~136	9~3 6~3 <3	10.0 5.0 2.5	9807 2452 612.9	30
	如: 铝及轴承合金等	8~36	>6 6~3 <3	10.0 5.0 2.5	2452 612.9 153.2	60

2. 洛氏硬度

当材料的硬度较高或者试样过小、过薄时, 需用洛氏硬度计来测定硬度。洛氏硬度试验是用顶角为 120° 的金刚石圆锥体或直径为 1.588 mm 的淬火钢球作为压头, 在一定载荷作用下压入被测材料的表面, 根据压痕的深度直接在硬度指示盘上读得硬度值, 不用计算, 也不用查表, 甚为方便。洛氏硬度没有单位。

洛氏硬度测定原理如图 1-6 所示, 图中 0-0 为未加载荷时的位置; 1-1 为加上初载荷 (100 N) 后压头的位置, 此时压入深度为 h_1 ; 2-2 为加上主载荷后压头的位置, 此时压入深度为 h_2 ; 卸除主载荷

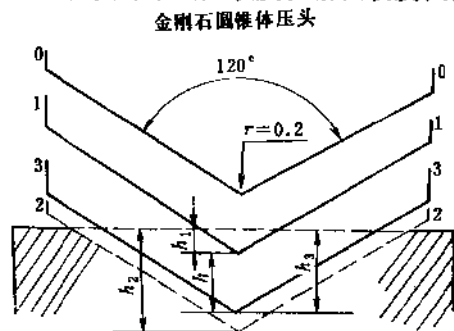


图1-6 洛氏硬度试验原理示意图

后, 由于弹性变形部分恢复, 压头提高到 3-3 位置, 此时压头的实际压入深度为 h_2 。洛氏硬度是以主载荷所引起的压入深度 ($h = h_2 - h_1$) 经过数学处理后来表示。加入初载荷的目的, 是使压头与零件表面接触良好, 以保证测量结果的准确性。

显然, 由主载荷所引起的压入深度 h 越大, 则材料的硬度越低, 而在指示盘上的硬度示值就越小。常用的洛氏硬度指标为 HRA、HRB 和 HRC。表 1-6 列有这三种洛氏硬度所使用的压头、载荷、硬度值有效范围以及使用范围。

表 1-6 洛氏硬度试验规范

符 号	压 头	载 荷 (N)	硬度值有效范围	使 用 范 围
HRA	120° 金刚石圆锥	600	<70	适用测量硬质合金、表面淬火层、渗碳层
HRB	$\frac{1}{16}$ " 钢球	1000	25~100 (60~230HBS)	适用测量有色金属, 退火及正火钢
HRC	120° 金刚石圆锥	1500	20~67 (230~700HBW)	适用测量调质钢、淬火钢

洛氏硬度试验的优点是操作迅速、简便, 可以直接读出硬度值, 而且压痕小, 可以测量成品和薄件的硬度。缺点是压痕小, 准确度较差, 常在零件不同部位测定三点取平均值。

3. 维氏硬度

维氏硬度试验原理如 1-7 所示, 以顶角为 136° 的金刚石四方角锥体作为压头, 在载荷 F 的作用下于金属表面压出一对角线长度为 d 的方形压痕 (面积为 A)。以方形压痕单位面积上所承受的载荷作为被测金属的硬度值, 用符号 HV 表示。

$$HV = 0.102 \frac{F}{A} = 0.1891 \frac{F}{d^2}$$

试验时根据方形压痕, 测出其两对角线的平均长度 d (mm), 经计算或查表即可求得维氏硬度值。维氏硬度试验法的优点是压痕轮廓清晰, 测量准确性高; 由于所加载荷小 (10~1000 N), 压入深度浅, 故主要用于测定极薄零件和表面硬度, 如渗碳层、氮化层的硬度等。其缺点是操作麻烦, 对表面质量要求高及组织不均匀的材料不适用。

非金属材料的硬度可用其它方法测定, 如划痕试验, 但塑料的硬度通常用洛氏硬度计来测定, 不过需要一种特殊的刻度。正如金属那样, 硬度越高, 强度一般也越高。但硬度并不能说明塑料耐磨性的好坏, 例如尼龙和聚甲醛有优良的耐磨性, 但硬度值并不高。

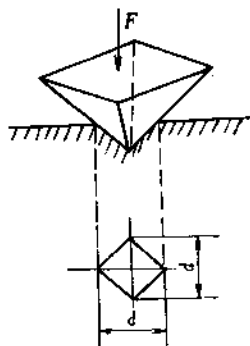


图 1-7 维氏硬度试验原理示意图

复 习 题

1. 说明 σ_s 、 σ_b 、 σ_{-1} 、 δ 、 ψ 、 a_K 和 E 各符号的意义和单位。
2. 在设计机械零件时多用哪两种强度指标, 为什么?
3. 说明各种硬度试验的原理, 并比较其优缺点。
4. 测定某钢的力学性能时, 已知试棒的直径是 10 mm, 其标距长度是直径的 5 倍, $F_s = 38 \text{ kN}$, $F_b = 77 \text{ kN}$, 拉断后的标距长度是 65 mm, 试求此钢的 σ_s 、 σ_b 及 δ 值各是多少?

第二章 金属和合金的结构与结晶

金属是富有光泽，具有优良导电性、导热性和塑性的物质。因为合金也具有这些特性，所以当我们广义地称金属时，其含意也包括合金。金属的这些特性是由原子构造特点决定的。金属原子的构造特点是围绕原子核运动的最外层电子数很少，通常只有1~2个，容易失去。所看到的金属材料中，每个原子的外层电子都容易脱离自己的轨道，贡献出来为全体原子所共有，这种共有化的电子也称自由电子（电子云），在金属中不停的自由运动。原子失去电子后便成为正离子，这些共有化的电子和正离子以静电引力结合起来就是金属键，如图2-1所示。所看到的各种金属，就是通过金属键把原子结合成一个整块而构成的。

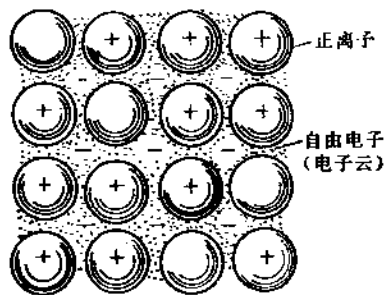


图2-1 金属键示意图

由于金属是由金属键结合而成的，自由电子在一定电位差下流动，就使金属具有优良的导电性。自由电子的运动能传递热能，所以金属的导热性好。当金属原子相对位移时，正离子和电子仍然保持结合，因而金属可以变形而不破坏，具有塑性。

第一节 金属的结构

一、晶体和非晶体

一切物质都是由原子构成的。根据原子在物质内部的排列方式不同，可将物质分为晶体和非晶体两大类。凡内部原子呈规律排列的物质称为晶体，固态下的金属都是晶体。凡内部原子无规则、杂乱地排列的物质，称为非晶体，松香、玻璃、沥青、树胶等即为非晶体。

晶体与非晶体比较，除其内部原子呈规则排列外，还具有一定的熔点和各向异性。

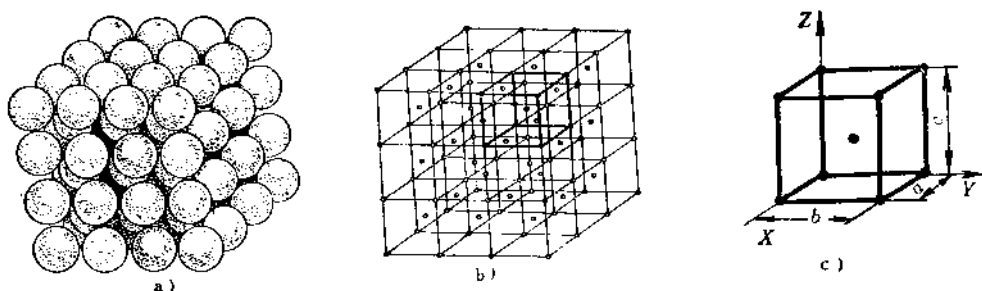
二、金属的晶体结构

1. 晶格（点阵）的基本概念

固态金属都是晶体，为了研究金属原子在空间的排列情况，可以认为金属原子是“静止”的，并把金属原子视为一个小球，金属晶体即是由这些小球按一定的规律在空间紧密地排列而成的，如图2-2a所示。又为了便于分析和描述各种晶体中原子的不同排列方式，有必要将原子抽象化，即把每个原子看成一个点。把这些点用假想线连接起来，就形成了空间格子，称为晶格（点阵），如图2-2b所示。

晶格中的最小几何单元，称为晶胞，如图2-2c所示。整个晶格就是由许多大小和形状完全相同的晶胞在空间重复堆砌而形成的。因此，晶胞的原子排列规律可完全反映出晶格中原子的排列情况。晶胞中各棱边的长度 a 、 b 、 c 称为晶格常数，以埃（ $\text{\AA}$ ）为单位来度量（ $1\text{\AA} = 10^{-8}\text{cm} = 0.1\text{nm}$ ）。

2. 常见金属的晶格类型

图2-2 α -Fe原子排列示意图

a) 原子的空间排列 b) 晶格 c) 晶胞

在金属晶体中, 由于金属原子的结合特点, 使金属彼此之间都尽可能趋于紧密排列, 致使大多数金属的晶格简单, 分别具有下列三种晶格类型。

(1) 体心立方晶格 它的晶胞是一个立方体, 在立方体的八个顶角和立方体的中心, 各排列一个原子 (图 2-3 a)。属于这种晶格类型的金属有 α -Fe、W、Mo、Cr、V 等。

(2) 面心立方晶格 它的晶胞也是一个立方体, 在立方体八个顶角和六个面的中心, 各排列一个原子 (图 2-3 b)。属于这种晶格类型的金属有 γ -Fe、Al、Cu、Ni、Pb 等。

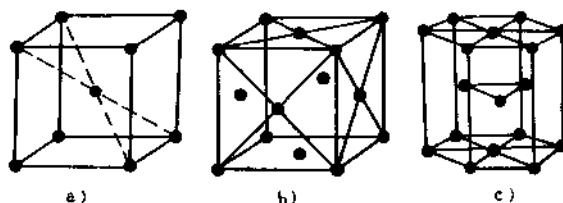


图2-3 金属中常见的三种晶格形式

a) 体心立方晶胞 b) 面心立方晶胞 c) 密排六方晶胞

(3) 密排六方晶格 它的晶胞是一个六方柱体, 在柱体的每个顶角上, 以及上、下底的中心各排列一个原子, 在晶胞中间还排列有三个原子 (图 2-3 c)。属于这种晶格类型的金属有 Mg、Zn、Be 等。

三、实际金属的结构

1. 单晶体与多晶体

晶体可以是单晶体, 也可多晶体。内部晶格位向完全一致时的晶体, 称为单晶体。单晶体不同方向上具有不同的性能, 称为“各向异性”。目前只能采用特殊方法才能制得单晶体。硅单晶和锗单晶是熟知的制造电子元件的材料。单晶体虽然具有高的强度, 但因其尺寸有限而且不能大量生产, 目前还不能广泛应用。

目前使用的金属材料都是多晶体, 即是由很多晶粒组成的。每个晶粒相当于一个单晶体, 各晶粒的原子排列情况虽然相同, 但排列的位向不同, 结果使不同方向性能一致, 这种现象称为“伪各向同性”。

2. 实际金属中的晶体缺陷

实际使用的金属, 其内部的原子排列并非完整无缺, 由于浇铸、变形加工等一系列原因, 往往使正常的原子排列受到破坏, 从而存在各种各样的缺陷。晶体中原子排列不规则的区域, 称为晶体缺陷。金属的晶体缺陷有以下几种。

(1) 空位和间隙原子 在实际晶体结构中, 晶格的某些结点上往往没有原子存在, 这种空着的位置称为空位。同时又可能在个别晶格空隙处出现多余的原子, 这种分布在晶格空隙当中的原子称为间隙原子。由于空位和间隙原子的出现, 造成了晶格畸变, 如图 2-4 所