

# 绪 论

20 世纪 70 年代人们把信息、材料和能源誉为当代文明的三大支柱。20 世纪 80 年代以高技术群为代表的新技术革命又把新材料、信息技术和生物技术并列为新技术革命的重要标志。这主要就是因为材料与国民经济建设、国防建设和人民生活密切相关。不断开发和使用材料的能力是任何一个社会发展的基础之一,先进的材料和工艺方法已经成为改善人类生活质量,提高工业生产率及促进经济进步的基本要求,材料也成为处理诸如环境污染、自然资源不断减少及价格膨胀等一些紧迫问题的工具。

材料是人类用于制造物品、器件、构件、机器或其他产品的物质。自从人类一出现就开始使用材料,材料的历史与人类的历史一样久远。人类为了生存和生产,总是不断地探索、寻找制造生产工具的材料,材料是人类进化的标志之一。在人类历史中,技术上的重大突破都是与新材料的发展及加工相联系的,任何工程技术都离不开材料的设计和制造工艺。例如,没有高温、高强度的结构材料,就不可能有今天的航空工业和宇航工业;没有半导体材料的工业化生产,就不可能有目前的计算机技术;没有低消耗的光导纤维,也就没有现代的光纤通信。一种新材料的出现,必将支持和促进当时文明的发展和技术的进步,从而把人类社会和物质文明推向一个新的阶段。在人类文明的进程中,根据人类使用的材料,划分出旧石器时代、新石器时代、青铜器时代和铁器时代。当今,人类正跨入人工合成材料和复合材料的新时代。



初识材料

## 0.1 中华民族对材料发展的重大贡献

在人类发展史上,我们的祖先有过辉煌的成就,对材料的发展作出了重大贡献。二三百万年前,最先使用的工具是石器,他们用坚硬的容易纵裂成薄片的燧石和石英石等天然材料制成石刀、石斧和石锄。到了新石器时代(公元前 6000 年至公元前 5000 年),中华民族的祖先们用黏土(主要成分为  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )烧制成陶器,东汉时期又发明了瓷器,并于公元 9 世纪传到非洲东部和阿拉伯国家,公元 13 世纪传到日本,公元 15 世纪传到欧洲。瓷器成为中国文化的象征,对世界文明产生了极大的影响。早在 4000 年前,我们的祖先已经开始使用天然存在的红铜,自夏朝起我国开始了青铜的冶炼,到殷、西周时期已发展到很高的水平,形成了灿烂的青铜文化。当时青铜主要用于制造各种工具、食器和兵器。在河南省安阳市出土的重达 875 kg 的司母戊鼎(见图 0-1),其器型高大厚重,花纹精巧,造型精美,工艺高超,因其鼎内部铸有“司母戊”三字而得名,是商朝青铜器的代表作,也是目前世界上发现的最大的青铜器;湖北江陵楚墓中发现的埋藏了 2000 多年的越王勾践的宝剑(见图 0-2),锋芒犀利,寒光闪闪,出土时插在漆木鞘里,保存如新,至今尤能断发,经分析测定,剑脊含锡低(10%),韧性好而不易折断,刃部含锡高(20%),刚而锋利,直到近代其他国家才掌握了这种复合金属制造技术,这些都说明我国当时已具备高超的冶炼技术和艺术造诣。公元前 7 世纪至公元前 6 世纪的春秋战国时期,我国开始大量使用铁器,白口铸铁、麻口铸铁和可锻铸

铁相继出现,比欧洲国家早 1800 多年,如河北省武安市出土的战国期间的铁锄,经金相检验证明,该材料就是先进的可锻铸铁;从兴隆战国铁器遗址中发掘出的浇铸农具用的铁模,说明冶铸技术已由泥砂造型水平进入铁模铸造的高级阶段。到了西汉时期,炼铁技术有很大的提高,采用煤作为炼铁的燃料,比欧洲早 1700 多年,在河南省巩县汉代冶铁遗址中,发掘出了 20 多座冶铁炉和锻炉,炉型庞大,结构复杂,并有鼓风装置和铸造坑,生产规模壮观。



图 0-1 司母戊鼎



图 0-2 越王勾践宝剑

许多史书和出土文物证明,早在 2000 多年以前,我国就开始采用热处理技术来提高钢铁材料的性能。西汉《史记·天官书》中有“水与火合为淬”一说,正确地说出了钢铁加热、水冷的淬火热处理工艺要点;《汉书·王褒传》中记载有“巧冶铸干将之朴,清水淬其锋”的制剑技术,热处理技术已具有相当高的水平;明代科学家宋应星在《天工开物》一书中对钢铁的退火、淬火、渗碳工艺,以及冶铁、铸钟、锻铁、焊接等多种金属成形及改性方法和日用品的生产经验进行了详细论述,并附有 123 幅工艺流程插图,是世界上有关金属加工工艺最早的科学论著之一。

历史充分说明,我们勤劳智慧的祖先在材料的创造和使用上有着辉煌的成就,为人类文明、世界进步作出了巨大贡献。

新中国成立后,我国在工农业生产迅速发展的同时,作为物质基础的材料工业也得到了高速发展,取得了举世瞩目的成就。1949 年,全国钢产量只有 15.8 万 t,不到世界钢产量的千分之一。1996 年,我国钢产量首次超过 1 亿 t,成为世界第一产钢大国。2008 年,我国粗钢产量突破 5 亿 t,占全球产量的近 40%。2005 年,我国结束了净进口钢的历史。20 世纪 90 年代以来,国家又相继提出重点加强能源原材料等基础产业,振兴机械、电子、汽车等支柱产业,加快振兴装备制造业的战略构想。目前,我国钢铁产业规模快速扩大,产品品种优化,质量明显改善;技术装备水平大幅提升,装备国产化率显著提高,中国钢铁业在世界钢铁业已具有举足轻重的地位。有色金属产量实现了持续增长,2008 年,我国 10 种有色金属产量为 2519 万 t,连续 7 年居世界第一。我国是世界最大的稀土资源生产、应用和出口国,在国际市场上处于支配和主导地位,我国稀土矿产品产量 12.5 万 t,冶炼分离产品、稀土永磁材料、发光材料、储氢材料均居世界第一位。

近年来,我国在新材料和材料加工新工艺的研究工作中取得了卓有成效的重大成果。

CPU 等芯片的研发取得了突破,高性能计算机和服务器的开发获得了成功,工业产品质量总体水平跃上了一个新台阶,机械工业主要产品中有 35%~40%的产品质量已经接近或达到国际先进水平,基础元器件和高新技术产品与国际先进水平的差距不断缩小。载人航天、月球探测工程取得了伟大成就,2003 年我国第一艘载人飞船“神舟五号”成功发射,2007 年我国首颗探月卫星“嫦娥一号”成功发射,航天航空事业的迅速发展带动了钛合金、铝合金、镍合金、高温陶瓷、复合材料等航空航天材料的发展。这些成果的产生都是与材料科学及工程技术的支持分不开的。

总之,随着近代科学技术的发展,对工程材料的要求也越来越高,机械技术人员需要掌握材料科学的基本理论和基本知识,研究和发明新的材料和新的工艺,合理使用各种工程材料,来提高我国机械工业中材料的利用率和机械产品的质量。

## 0.2 工程材料的分类

### 0.2.1 根据材料的物理化学属性分类

根据材料的物理化学属性来分类,工程材料可以分为金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料。

#### 1. 金属材料

由于金属材料不仅来源丰富,还具有优良的使用性能和工艺性能,因此它是目前应用最广泛的工程材料。金属材料又可以分为如下两类:

(1) 黑色金属。黑色金属是指铁和以铁为基的合金材料,即钢铁材料,包括铸铁、碳钢和合金钢。

(2) 有色金属。有色金属是指除黑色金属以外的所有金属及其合金材料,包括轻有色金属(如铝、镁等)、重有色金属(如铜、铅等)、稀有金属及稀土等。

#### 2. 高分子材料

高分子材料是以高分子化合物为主要组分材料。机械工程中使用的分子材料主要是人工合成的有机高分子聚合物。高分子材料分类方法很多,按用途分为工程塑料、橡胶、合成纤维、胶黏剂、涂料等。

#### 3. 陶瓷材料

陶瓷是天然或合成化合物经过成形和高温烧结制成的一类无机非金属材料。陶瓷材料按照原料不同可以分为普通陶瓷(即传统的硅酸盐陶瓷,如玻璃、水泥、陶瓷及耐火材料等)和特种陶瓷(即新型陶瓷,除了  $\text{SiO}_2$  之外的其他氧化物、碳化物、氮化物等材料)两种。

#### 4. 复合材料

复合材料是把两种或两种以上不同性质或不同结构的材料以微观或宏观的形式组合在一起而形成的材料,其性能优于它的组成材料。复合材料是一种新型的、具有很大发展前途的工程材料,现代航空发动机燃烧室温度最高的材料就是通过粉末冶金法制备的氧化物粒子弥散强化的镍基合金复合材料,很多高级游艇、赛艇及体育器械等是由碳纤维复合材料制成的,它们具有质量小、弹性好、强度高优点。

“嫦娥五号”探测器 2020 年 12 月 1 日成功在月球着陆,这是中国进行外空探索的历史性一步。“嫦娥五号”上携带了一面真正的国旗,质量仅为 12g,而这面国旗需要在 1s 内完成展示动作。为了完成这项任务,科研团队在选材上花费的时间就超过了一年,挑选出二三十种纤维材料,然后通过一系列物理试验,最终决定采用一种新型复合材料,既能满足强度的要求,又能满足染色性能的要求,还能保证国旗卷起时在 $\pm 150^{\circ}\text{C}$ 的温差环境下不会粘连在一起。这是五星红旗第一次在月球表面进行动态展示,为这轮寄托了古往今来人们无数情思的明月添上了一抹令人骄傲的中国红。

### 0.2.2 根据性能要求分类

根据性能要求来分类,工程材料可以分为结构材料与功能材料。

(1) 结构材料。结构材料是以力学性能为基础,用于制造受力构件所用的材料。当然,结构材料对物理或化学性能也有一定的要求,如光泽、热导率、抗辐照、抗腐蚀、抗氧化等。

(2) 功能材料。功能材料主要是利用物质独特的物理、化学性质或生物功能等而形成的一类材料。

一种材料往往既是结构材料又是功能材料,如铁、铜、铝等。

### 0.2.3 根据材料使用时间分类

根据材料使用时间来分类,工程材料可分为传统材料与新型材料。

(1) 传统材料。传统材料是指那些已经成熟且在工业中已批量生产并大量应用的材料,如钢铁、水泥、塑料等。这类材料由于其用量大、产值高、涉及面广,又是很多支柱产业的基础,所以又称为基础材料。

(2) 新型材料(先进材料)。新型材料是指那些正在发展的且具有优异性能和应用前景的一类材料。

新型材料与传统材料之间并没有明显的界限。传统材料通过采用新技术,提高技术含量,提高性能,大幅增加附加值也有可能成为新型材料;新型材料在经过长期生产与应用之后也会成为传统材料。传统材料是发展新材料和高新技术的基础,而新型材料又往往能推动传统材料进一步发展。

# 第 1 篇 基本理论篇



# 第 1 章 工程材料的性能

## 1.1 金属材料的力学性能

**【小小疑问】**各种各样的材料那么多。用的时候怎么选取？到底能不能用，有什么依据？

**【问题解答】**选用的依据是性能！选用的首要原则是满足使用性能。

在机械制造中，一般机械零件是在常温、常压下使用。但有一些机械零件要在高温、高压和腐蚀介质中使用，如化工机械、石油机械和锅炉中的容器、管道等。生产者往往需要根据零件的不同使用要求采用不同性能的材料。

工程材料的常用性能可分为两类：使用性能和工艺性能。使用性能是指机械零件在正常工作情况下，能保证安全、可靠工作所应具备的性能，包括材料的力学性能和物理、化学性能等。工艺性能是指机械零件在冷、热加工制造过程中应具备的性能，它包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理性能及切削加工性能等。使用性能决定了材料的使用范围和寿命，对绝大多数工程材料来讲，其力学性能是最重要的使用性能。

力学性能是金属材料在各种形式的力的作用下所表现出来的特性，显示了材料抵抗外力的能力，即金属抵抗外加载荷引起变形和断裂的能力。

金属材料的力学性能是在实验室中利用不同的试验方法来确定的。常用的力学性能有强度、塑性、刚度、弹性、硬度、冲击韧性、断裂韧性、耐磨性和疲劳强度等。

### 1.1.1 静载时金属材料的力学性能

单向静拉伸试验是工业上应用最广泛的金属力学性能试验方法之一。通过对标准的光滑圆柱试样进行拉伸试验可以测定金属材料的最基本力学性能，如强度、刚度、弹性和塑性。GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法》中规定了金属材料的强度和塑性拉伸试验的测定方法与要求。

拉伸力-伸长曲线(简称拉伸曲线)是拉伸试验中记录力对伸长量的关系曲线。低碳钢的单向静载拉伸曲线如图 1-1 所示。由图可见，低碳钢试样在拉伸过程中，可以分为弹性变形、塑性变形和断裂三个阶段。OE 段为弹性变形阶段，即去掉外力后，变形立即恢复，这种变形称为弹性变形；当载荷超过 E 点载荷后，试样将进一步伸长，但此时若去除载荷，弹性变形消失，而另一部分变形被保留，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；随后，拉伸曲线出现了水平的或锯齿形的线段，这表明在载荷基本



静载时的力学性能

不变的情况下,试样在继续变形,这种现象称为“屈服”, $F_{eH}$  是曲线首次下降前的最大力, $F_{eL}$  是试样屈服时不计初始瞬时效应时的最小力; $C$  点之后,外力增加不多,试样明显伸长,这表明试样开始产生大量塑性变形, $CM$  段为大量塑性变形阶段;当载荷继续增加到某一最大值  $F_M$  时,试样的局部截面积缩小,即产生缩颈现象, $MK$  段称为缩颈阶段,而试样的承载能力也逐渐降低,当达到拉伸曲线上的  $K$  点时,试样随即断裂, $F_K$  为试样断裂时的载荷。

由拉伸曲线可见,断裂时试样总伸长  $Of$  中, $gf$  是弹性变形, $Og$  是塑性变形,其中, $Oh$  是试样产生缩颈前的均匀变形, $hg$  是颈部的集中变形。

材料的断裂通常有两种方式:韧性断裂和脆性断裂。低碳钢断裂前会产生明显的塑性变形,发生的断裂称为韧性断裂,其断口一般有细小凸凹,呈纤维状,灰暗无光。而某些脆性材料(如铸铁等)在尚未产生明显的塑性变形时已经断裂,不仅没有屈服现象,也不会产生缩颈现象,这种断裂称为脆性断裂,脆性断裂可沿晶界发生,也可穿过晶粒发生,按断口形貌区分,前者称为沿晶断裂,断口凸凹不全,呈颗粒状,后者称为穿晶断裂,断口比较平坦。脆性断裂往往没有预兆就会发生,常导致灾难性事故,故危害性极大。

拉伸曲线上的力和伸长量不仅与试样的材料性能有关,还与试样的尺寸有关。为了消除试样尺寸的影响,将图 1-1 拉伸力-伸长曲线的纵、横坐标分别用拉伸试样的原始截面积  $S_0$  和引伸计标距  $L_e$  相除,即纵坐标以应力  $R(R = \text{拉伸力 } F / \text{试样原始截面积 } S_0)$  表示,横坐标以延伸率  $e(e = \text{延伸 } \Delta L_e / \text{引伸计标距 } L_e)$  表示,则得到应力-延伸率曲线,即  $R-e$  曲线(见图 1-2)。因均为以一相应常数相除,故曲线形状相似。根据  $R-e$  曲线便可建立金属材料在静拉伸条件下的力学性能指标。

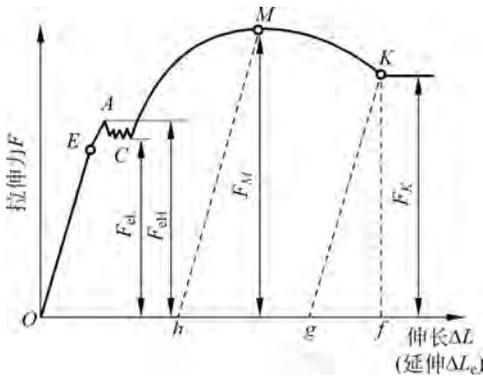


图 1-1 低碳钢的单向静载拉伸曲线

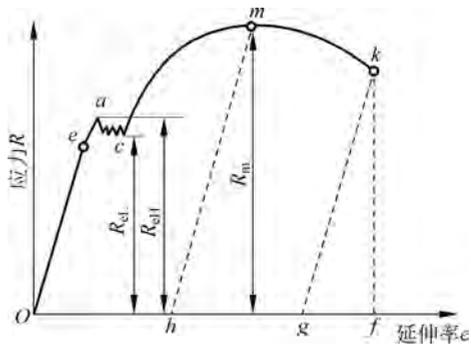


图 1-2 低碳钢的应力-延伸率曲线

### 1. 强度

强度是指材料在静载荷作用下抵抗产生塑性变形或断裂的能力。根据载荷的不同,可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度和抗剪强度等。当承受拉力时,强度特性指标主要是屈服强度和抗拉强度。

#### 1) 屈服强度

随着载荷的增大,拉伸曲线出现屈服阶段(见图 1-1),在应力-延伸率曲线(见图 1-2)上分为上屈服强度和下屈服强度。

试样发生屈服而力首次下降前的最高应力称为上屈服强度,用  $R_{eH}$  表示,单位为 MPa,即

$$R_{eH} = F_{eH}/S_0 \quad (1-1)$$

式中,  $F_{eH}$  为试验时在拉伸曲线上读取的曲线首次下降前的最大力, N;  $S_0$  为试样原始截面积,  $\text{mm}^2$ 。

试样在屈服期间,不计初始瞬时效应(见图 1-3)时的最低应力称为下屈服强度,用  $R_{eL}$  表示,单位为 MPa,即

$$R_{eL} = F_{eL}/S_0 \quad (1-2)$$

式中,  $F_{eL}$  为在拉伸曲线上试样屈服时,不计初始瞬时效应时的最小力, N。

显然,用应力表示的上屈服强度和下屈服强度就是表征材料对微量塑性变形的抗力,并且用下屈服强度  $R_{eL}$  作为材料屈服强度,因为正常试验条件下,测定  $R_{eL}$  的再现性较好。

对于无明显屈服现象的材料(如高碳钢和某些经热处理后的钢等),无法确定其屈服强度,可采用规定塑性延伸强度  $R_p$  表示,它是指试样在加载过程中,在塑性延伸率等于规定的引伸计标距  $L_e$  百分率时对应的应力,如图 1-4 所示,  $e_p$  为规定的塑性延伸率,使用的符号应附下脚标说明所规定的塑性延伸率,如  $R_{p0.2}$  表示规定塑性延伸率为 0.2% 时对应的应力值。

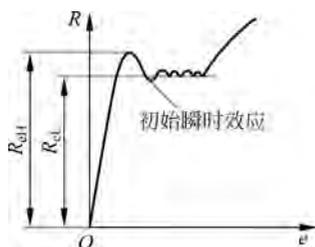


图 1-3 低碳钢的上屈服强度和下屈服强度

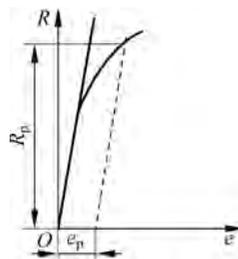


图 1-4 规定的塑性延伸强度

机械零部件或构件在使用过程中一般不允许发生塑性变形,否则会引起零件精度的降低或影响与其他零件的相对配合而造成失效,所以屈服强度是零件设计时的主要依据,也是评定材料强度的重要指标之一。

## 2) 抗拉强度

抗拉强度是材料在破断前所能承受的最大应力值,用  $R_m$  表示,单位为 MPa,即

$$R_m = F_m/S_0 \quad (1-3)$$

式中,  $F_m$  为试样在破断前所承受的最大力, N。

抗拉强度表示塑性材料抵抗大量均匀塑性变形的能力。抗拉强度是零件设计时的重要依据,也是评定金属材料强度的重要指标之一。对于脆性材料,由于拉伸时没有明显的屈服现象,此时一般用抗拉强度指标作为设计依据。

## 2. 塑性

塑性是指金属材料在静载荷作用下产生塑性变形而不被破坏的能力。断后伸长率和断面收缩率是表示金属材料塑性好坏的指标。

### 1) 断后伸长率

断后伸长率是指试样拉断后标距增长量与原始标距长度之比,用  $A$  表示,即

$$A = (L_u - L_0) / L_0 \times 100\% \quad (1-4)$$

式中,  $L_u$  为试样断裂后的标距长度, mm;  $L_0$  为试样原始的标距长度, mm。

断后伸长率的数值和试样标距长度有关,随标距的增加而减小,因此,为了使同一金属材料制成的不同尺寸的拉伸试样得到相同的断后伸长率值,要求  $\frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = K$  (常数),通常  $K$

取 5.65 或 11.3 (在特殊情况下,  $K$  也可以取 2.82、4.52 或 9.04),即对于圆柱形拉伸试样,相应的尺寸有短比例试样 ( $L_0 = 5d_0$ ) 和长比例试样 ( $L_0 = 10d_0$ ) ( $d_0$  是试样圆截面的直径),求得的断后伸长率分别以符号  $A$  和  $A_{11.3}$  表示。对于非比例试样符号  $A$  应附下脚标,说明使用的原始标距,以 mm 计,如  $A_{80\text{mm}}$  表示原始标距为 80mm 的断后伸长率。

### 2) 断面收缩率

断面收缩率是指试样拉断处横截面积的缩减量与原始横截面积之比,用  $Z$  表示,即

$$Z = (S_0 - S_u) / S_0 \times 100\% \quad (1-5)$$

式中,  $S_u$  为试样断裂处的最小横截面积,  $\text{mm}^2$ 。

材料的断后伸长率  $A$  和断面收缩率  $Z$  的数值越大,则表示材料的塑性越好。虽然塑性指标通常不直接用于工程设计计算,但任何零件都要求材料具有一定的塑性。因为零件在使用过程中,偶然过载时,由于能发生一定的塑性变形而不至于突然断裂。同时,塑性变形还有缓和应力集中、削减应力峰的作用,在一定程度上保证了零件的工作安全。此外,材料的塑性对要求进行冷塑性变形加工的工件有着重要作用,各种成形加工(如锻压、轧制、冷冲压等)都要求材料具有一定的塑性。

## 超塑性金属材料

超塑性金属材料是指伸长率大于 300% 的金属。它是 1920 年德国材料专家罗森汉在研究锌-铝-铜合金时发现的。超塑性是在特定条件下的一种奇特现象,超塑性金属材料能像软糖一样伸长 10 倍、20 倍,甚至上百倍,既不出现缩颈,也不会断裂。最常用的铝、镍、铜、铁、钛合金,它们的伸长率在 200%~6000%。如碳钢和不锈钢在 150%~800%,铝锌合金为 1000%,纯铝高达 6000%。

超塑性材料加工具有很大的实用价值。难变形的合金因超塑性变成了软糖状,从而可以像玻璃和塑料一样,用吹塑和可挤压加工的方法制造零件,从而大大节省了能源和设备。超塑性材料制造零件的另一个优点是可以一次成型,省掉了机械加工、铆焊等工序,达到了节约原材料和降低成本的目的。据专家展望,未来超塑性材料将在航天、汽车、车厢制造等行业中广泛采用。

## 3. 刚度和弹性

### 1) 弹性模量

刚度是金属材料重要的力学性能之一。工程上弹性模量被称为材料的刚度,表征金属材料对弹性变形的抗力,在应力-应变曲线上,弹性模量就是试样在弹性变形阶段线段的斜率,即引起单位弹性变形时所需的应力,用  $E$  表示,单位为 MPa。弹性模量值越大,则在相