

JINSHU CAILIAO  
JI  
RECHULI

# 金属材料及热处理

王英杰 田庆平 主编  
金 升 赵儒君 主审



中国铁道出版社

994

5.1  
1.2

# 金属材料及热处理

王英杰 田庆平 主编  
金 升 赵儒君 主审



A0937980

中 国 铁 道 出 版 社

1999年·北京

# 前 言

《金属材料及热处理》是职业教育学校教材,适用于冷加工、热加工、管理类及近机类专业。针对目前金属工艺学课程教学过程中出现的新要求、新特点以及某些教材中存在的缺点,山西省职业技术教育学会中专金工委员会成立了“金属工艺学”系列教材编写组,负责本套教材的编写工作。在编写前,查阅了大量的参考资料,积极汲取各种现有教材的优点,进行了合理的编写。

新编《金属材料及热处理》教材,在内容上尽量做到布局合理、内容丰富新颖、难度适中;在语言方面做到精炼、准确、通俗易懂,插图形象生动;在内容组织上注意逻辑性、系统性,突出实践性;在时代性上尽量做到反映机械零件生产方面的新技术、新材料、新工艺,使教师和学生的认识在一定层次上能跟上科技发展与职业技术教育的新要求。每章附有较全面的各种类型的复习题,供学生自我检查掌握所学的基础知识情况。考虑到教学 and 实际需要,将“非金属材料”内容作为附录编入本书。另外,本教材备有完整的试题库及计算机组卷操作软件(待出版),供教师进行考试组卷。

本教材除供职业技术教育学校使用外,还可作为成人教育和机械类中级技术工人的培训教材,也可作为有关人员的参考书。

本书主编是王英杰、田庆平;副主编是张雅琴、王耀华。全书由王英杰统稿。

编论由山西省忻州地区农业机械化学学校张存来编写;第一章由太原铁路机械学校李雪芳编写;第二章由山西省纺织工业学校许开元编写;第三章由太原铁路机械学校向秀梅和金华铁路司机学校汤勤学共同编写;第四章由华北机电学校田庆平编写;第五章由金华铁路司机学校汤勤学编写;第六章由太原化工学校张雅琴编写;第七章由太原铁路机械学校王耀华和华北机电学校田庆平共同编写;第八章由华北机电学校田庆平编写;第九章由太原化工学校张雅琴编写;第十章由山西省纺织工业学校许开元编写;第十一章由太原铁路机械学校王耀华编写;书中插图由太原锅炉厂徐慧君绘制。

本书由金华铁路司机学校高级讲师金升、南京浦镇车辆厂技工学校高级讲师赵儒君审稿;此外,参加审稿的人员还有华北机电学校孟培祥、太原铁路机械学校李雪芳、山西省建筑工程学校岳柏山,最后由山西省职业技术教育学会中专金工委员会审定通过。

由于编写时间及编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请广大读者批评与指正。

“金属工艺学”系列教材编写组

1999年6月

# 前 言

《金属材料及热处理》是职业教育学校教材,适用于冷加工、热加工、管理类及近机类专业。针对目前金属工艺学课程教学过程中出现的新要求、新特点以及某些教材中存在的缺点,山西省职业技术教育学会中专金工委员会成立了“金属工艺学”系列教材编写组,负责本套教材的编写工作。在编写前,查阅了大量的参考资料,积极汲取各种现有教材的优点,进行了合理的编写。

新编《金属材料及热处理》教材,在内容上尽量做到布局合理、内容丰富新颖、难度适中;在语言方面做到精炼、准确、通俗易懂,插图形象生动;在内容组织上注意逻辑性、系统性,突出实践性;在时代性上尽量做到反映机械零件生产方面的新技术、新材料、新工艺,使教师和学生的认识在一定层次上能跟上科技发展及职业技术教育的新要求。每章附有较全面的各种类型的复习题,供学生自我检查掌握所学的基础知识情况。考虑到教学 and 实际需要,将“非金属材料”内容作为附录编入本书。另外,本教材备有完整的试题库及计算机组卷操作软件(待出版),供教师进行考试组卷。

本教材除供职业技术教育学校使用外,还可作为成人教育和机械类中级技术工人的培训教材,也可作为有关人员的参考书。

本书主编是王英杰、田庆平;副主编是张雅琴、王耀华。全书由王英杰统稿。

绪论由山西省忻州地区农业机械化学学校张存来编写;第一章由太原铁路机械学校李雪芳编写;第二章由山西省纺织工业学校许开元编写;第三章由太原铁路机械学校向秀梅和金华铁路司机学校汤勤学共同编写;第四章由华北机电学校田庆平编写;第五章由金华铁路司机学校汤勤学编写;第六章由太原化工学校张雅琴编写;第七章由太原铁路机械学校王耀华和华北机电学校田庆平共同编写;第八章由华北机电学校田庆平编写;第九章由太原化工学校张雅琴编写;第十章由山西省纺织工业学校许开元编写;第十一章由太原铁路机械学校王耀华编写;书中插图由太原锅炉厂徐慧君绘制。

本书由金华铁路司机学校高级讲师金升、南京浦镇车辆厂技工学校高级讲师赵儒君审稿;此外,参加审稿的人员还有华北机电学校孟培祥、太原铁路机械学校李雪芳、山西省建筑工程学校岳柏山,最后由山西省职业技术教育学会中专金工委员会审定通过。

由于编写时间及编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请广大读者批评与指正。

“金属工艺学”系列教材编写组

1999年6月

## 绪 论

材料的使用与加工是人类文明发展的重要里程碑。历史上的所谓青铜时代和铁器时代就是以材料作为时代标志的,它象征着人类社会科学技术进步的程度。今天,如果没有耐高温、高强度、高性能的钛合金等金属材料,就没有现代宇航工业。所以,早在70年代,国外就有人把金属材料比做现代工业的骨架。因此,我们今天的科学技术乃至整个社会,如果没有各种金属材料,那是不堪设想的。

人类社会从石器时代进入青铜时代以后,金属材料在人类生活中占据了十分重要的地位。特别是大规模生产钢铁的工艺出现以后,金属材料的消耗量急剧上升,从而使地球上的金属资源越来越少。据估计,铁、铝、铜、锌、银等几种主要金属的储量,只能再开采100年到300年。怎么办呢?一是向地壳的深部要金属;二是向海洋要金属;三是节约金属材料,寻找它的代用品。目前,世界各国都注重金属材料的节约,充分发挥其潜力。如轻体汽车的设计,就是利用高强度钢材与非金属材料等,做到减轻汽车自重,节约金属材料,并达到省油的目的。

到20世纪中叶,随着科技的发展、社会环保意识的加强以及生产的需求,正出现越来越多的非金属材料。非金属材料的使用,不仅满足了机械工程中的特殊需求,而且还大大简化了机械制造的工艺过程,降低了成本,提高了产品的使用性能。其中比较突出的就是:塑料、陶瓷与复合材料等的广泛应用。目前它们的特殊性能正在不断地得到广大工程技术人员的认可,应用正在不断地扩大。另外,在金属材料的加工工艺技术方面,也出现了日新月异的发展。如,激光技术的应用,计算机在零件各个加工过程中的应用,设备的创新,零件加工技术的改进与突破等都使传统的机械零件加工技术发生了巨大的变化。因此,作为一名工程技术人员或管理人员,了解金属材料的性能、应用、加工工艺过程以及新的加工技术是非常重要的。

我国是使用金属材料最早的国家之一,使用铜的历史约有4000多年。大量出土的上古时代青铜器,说明在商代(公元前1562年~公元前1066年)就有了高度发达的青铜加工技术。例如:河南安阳出土的司母戊大方鼎,带耳高1.37 m,横1.1 m,宽0.77 m,重达875 kg。这是商殷祭器,体积庞大、花纹精巧、造型精美。在当时的条件下要浇铸这样大的器物,如果没有大规模的劳动分工和熟练的铸造技术,是不可能成功的。

我国早在公元前六世纪即春秋末期,就已出现了人工冶炼的铁器,比欧洲出现生铁早1900多年。

我国古代创造了三种炼铜方法:第一种是从矿石中直接炼出的自然铜,用这种铜制作的剑在东方各国享有盛誉,东汉时期传入欧洲;第二种是西汉期间经过“百次”冶炼锻打的百炼铜;第三种是南北朝时期的灌钢。先炼铁,后炼钢的两步炼钢技术,我国比其他国家早1600多年。明朝宋应星所著《天工开物》一书中明确记载了冶铁、炼钢、铸钟、锻铁、淬火等多种金属的加工方法,它是世界上有关金属加工工艺最早的科学著作之一。

历史充分说明,我国古代劳动人民在金属材料及其工艺方面取得了辉煌的成就,为人类文明作出了巨大的贡献。只是到了近代,由于封建制度的日益腐败和外国的侵略,严重阻碍了这门技术的发展。

新中国成立后,我国在金属材料、非金属材料及其加工工艺理论研究方面有了很大的提高,推动了机械制造、矿山冶金、交通运输、石油、电子仪表、宇宙航行等现代化工业的发展。原子弹、氢弹、导弹的试验成功,人造地球卫星的发射等,标志着我国在机械工程材料及其加工工艺方面都达到了新的水平。相信在不远的将来,我国的金属材料及其加工工艺水平定能进入世界先进行列。

可以这样说,只有金属材料及其加工工艺水平的发展,才会有力地促进工业的发展和科学技术的进步,才会加快国民经济的步伐。但是,目前我国国家工业的整体工艺水平还很落后,非常需要我们工程技术人员深入地研究有关金属工程材料及其加工工艺理论。

《金属材料及热处理》较系统地介绍了金属材料与非金属材料的种类、生产过程、性能和应用方面的基础知识,是融汇多种专业知识为一体的技术基础课,是培养从事机械制造行业应用型、管理型与复合型人才的一必修课程。掌握这些内容不仅使设计更合理,更具有先进性,而且还会培养零件生产的经济性意识,达到提高生产率,降低成本,提高产品质量的目的。对于从事现代机械制造行业的技术工人来讲,学习本课程的有关内容也有其特殊的意义。因为机械产品的生产,其核心与目的是为了获得合格的优质产品,而机械产品的质量问題,主要发生在产品的制造过程中,这其中的60%~70%是由于工艺因素造成的。产品质量差,会造成成本增加,资源浪费,使产品失去竞争力。产品质量好会给企业带来活力与信誉,为国家创造更多的财富,并取得较好的社会效益。

该书具有内容广和实践性强的特点。因此,在学习中要多联系自己在金属材料方面的感性知识,做到注重理论联系实际,这样才能学好书中的有关理论知识。

学习本课程的基本要求:

初步掌握常用材料的牌号、性能、用途和一般选用原则,了解常用热处理工艺的特点及应用。

1. 了解钢铁的生产过程、原料、方法、产品及有关概念。
2. 了解材料的性能指标、性能的测试方法以及各个性能指标的应用。
3. 了解金属和合金的晶体结构及其结晶过程,熟悉有关相图知识。
4. 熟悉钢的热处理原理、方法及其应用。
5. 了解碳钢、合金钢、铸铁、有色金属材料的牌号、成分、组织、热处理方法、性能及用途。
6. 根据所学知识基本学会为典型零件进行选材、判定性能要求及热处理方法。
7. 了解金属腐蚀的危害、原理、分类以及防止金属腐蚀产生的措施和方法。
8. 了解常用非金属材料的性能、分类及其应用。

# 第一章 金属材料的分类与钢铁材料的生产过程

金属材料是现代工农业生产中使用最广的机械工程材料。对机械制造工作者来说,了解金属材料的分类以及生产过程具有非常重要的意义。

## 第一节 金属材料的分类

金属是指具有良好的导电性和导热性,有一定的强度和塑性,并具有光泽的物质,如铁、铝和铜等。金属材料是由金属元素或以金属元素为主要材料,并具有金属特性的工程材料。它包括纯金属和合金两类。

纯金属在工业生产中虽然具有一定的用途,但是,由于它的强度、硬度一般都较低,而且冶炼困难,价格较高。因此,在使用上受到很大的限制。目前在工业生产中广泛使用的是合金状态的金属材料。

合金是一种金属元素与其他金属元素或非金属元素,通过熔炼或其他方法结合的具有金属特性的物质。例如普通黄铜是由铜和锌两种金属元素组成的合金,碳素钢是由铁和碳组成的合金,保险丝是铅、锡、铋、镉的合金。与组成合金的纯金属相比,合金除具有更好的力学性能外,还可以调整组成元素之间的比例,以获得一系列性能各不相同的合金,从而满足工业生产上不同的性能要求。

金属材料,尤其是钢铁材料在国民经济及其他方面都有重要作用,这是由于它具有比其他材料优越的性能,如物理性能、化学性能、力学性能和工艺性能。它能够适应生产和科学技术发展的需要。

金属(或金属材料)通常分为黑色金属和有色金属两大类。

1. 黑色金属 以铁或以它为主而形成的物质,称为黑色金属,如钢和生铁。
  2. 有色金属 除黑色金属以外的其他金属,都称为有色金属,如铜、铝和镁等。
- 在机械制造工业中,常用的金属材料如图 1-1 所列。

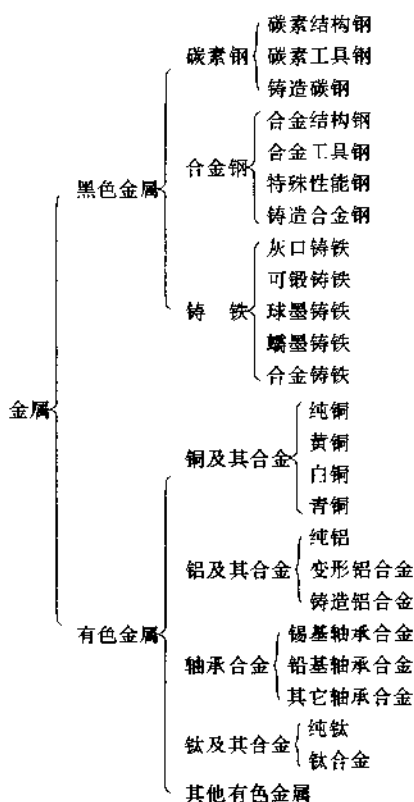
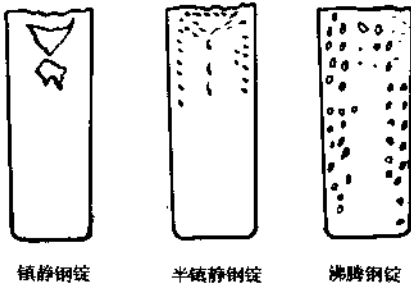


图 1-1 金属材料的分类

2. 炼钢方法 现代炼钢方法主要有转炉、电炉和平炉等。



强 ← 脱氧程度 → 弱

图 1-3 镇静钢锭、半镇静钢锭和沸腾钢锭

组织致密,质量较高。由于钢锭头部形成相当深的缩孔,轧制时被切除,钢的浪费较大,如图 1-3 所示。

(2) 沸腾钢 钢水在冶炼后期仅用锰铁进行不充分的脱氧。钢水浇入钢锭模后,钢水中的 FeO 和碳相互作用,脱氧过程仍在进行( $\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO} \uparrow$ ),生成的 CO 气体,引起了钢水沸腾现象。大部分气体逸出,少量气体凝固时被封闭在钢锭内部,形成许多小气泡,如图 1-3 所示。这类钢锭不产生缩孔,切头浪费小。但是,钢的成分不均匀,组织不够致密,质量较差。沸腾钢只能是低碳钢。

(3) 半镇静钢 半镇静钢介于镇静钢和沸腾钢两者之间。如图 1-3 所示。表 1-1 为镇静钢和沸腾钢的脱氧程度和力学性能的对比。

表 1-1 镇静钢和沸腾钢的特点和性能

| 项目   | 镇静钢                       | 沸腾钢                           |
|------|---------------------------|-------------------------------|
| 脱氧程度 | 脱氧完全,基本上无 CO 气泡产生,钢水浇注时平静 | 脱氧不完全,产生大量 CO 气泡,钢水浇注后有明显沸腾现象 |
| 特点   | 表面质量一般,偏析轻微               | 表面质量良好,偏析较严重                  |
| 力学性能 | 冲击韧性良好                    | 冲击韧性较差                        |
|      | 在条件相同的情况下,强度与伸长率大致相同      |                               |

## 5. 炼钢的最终产品

钢锭经过轧制最终形成板材、管材、型材、丝材、其他材料 5 类产品。

(1) 板材 一般分为厚板和薄板。4~60 mm 为厚板,常用于造船、锅炉和压力容器;4 mm 以下为薄板,分冷轧和热轧钢板。薄板轧制后可直接交货或经过酸洗镀锌或镀锡后交货使用。

(2) 管材 分无缝钢管和有缝钢管两种。无缝钢管用于石油、锅炉等行业;有缝钢管是用带钢焊成,供煤气、自来水管等使用。焊接的钢管生产率高、成本低,但质量与性能与无缝铜管相比稍差些。

(3) 型材 常用的有方钢、圆钢、扁钢、角钢、工字钢、槽钢、钢轨等。

(4) 丝材 用线材经过冷拔而成,如高碳钢丝用于制作弹簧丝或钢丝绳,低碳钢丝用于捆绑或编织等。

(5) 其他材料 主要是指要求具有特种形状与尺寸的异形钢材。如车轮轮箍、齿轮轮坯等。



## 复 习 题

### 一、名词解释

①金属；②合金；③有色金属；④黑色金属；⑤钢铁。

### 二、填空题

1. 金属材料一般可分为\_\_\_\_\_金属和\_\_\_\_\_金属两类。
2. 钢铁材料是由\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_及 Si、Mn、S、P 等杂质元素组成的金属材料。
3. 生铁是由铁矿石经\_\_\_\_\_而获得的。高炉生铁一般分为\_\_\_\_\_生铁和\_\_\_\_\_生铁两种。
4. 现代炼钢方法主要有\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_等。
5. 根据钢水的脱氧程度不同,可分为\_\_\_\_\_钢、\_\_\_\_\_钢、\_\_\_\_\_钢三类。
6. 钢锭经过轧制最终会形成\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_等产品。

### 三、判断题

1. 钢和生铁都是以铁碳为主的合金。 ( )
2. 高炉炼铁的过程是使氧化铁还原,获得纯铁的过程。 ( )
3. 用锰铁、硅铁和铝块进行充分脱氧后,可获得镇静钢。 ( )
4. 钢中的 Mn、Si、S、P 等杂质元素含量一般都低于生铁。 ( )

### 四、简答题

1. 炼铁的主要原料有哪些? 它们各起什么作用?
2. 炼铁与炼钢的实质是什么? 目前主要的炼铁与炼钢方法有哪些?
3. 镇静钢、半镇静钢和沸腾钢之间的特点以及力学性能有何不同?

## 第二章 金属的性能

金属材料由于其特有的性能特点而被广泛应用。在机械制造行业中,为了设计制造具有竞争力的产品,就必须了解和掌握材料的各种性能以便在产品的设计、选材和制造等方面采取措施。通常把金属材料的性能分为使用性能和工艺性能。其中使用性能是指金属材料为保证机械零件或工具正常工作应具备的性能,即在使用过程中所表现出的特性。使用性能的好坏,说明这种材料在某种使用条件下是否方便耐用。它包括力学性能、物理性能和化学性能。

### 第一节 金属的力学性能

金属的力学性能是指金属在力或能的作用下所显示出来的一系列力学特性。如弹性、强度、硬度、塑性、韧性等。弹性是指物体在外力作用下改变其形状和尺寸,当外力卸除后物体又恢复到其原始形状和尺寸的特性。金属材料根据所载荷作用性质的不同,一般可分为静载荷、冲击载荷和循环载荷三种。根据载荷作用方式的不同,又可分为拉伸载荷、压缩载荷、弯曲载荷、剪切载荷和扭转载荷等。物体受外力作用后导致物体内部之间相互作用的力称为内力,面单位面积上的内力则称为应力( $N/mm^2$ )。应变是指由外力所引起的物体原始尺寸或形状的相对变化(%)。

金属力学性能的高低,表征金属抵抗各种损害作用的能力大小,是评定金属材料质量的主要判据,也是金属制件设计时选材和进行强度计算的主要依据。金属力学性能主要有:强度、塑性、硬度、冲击韧性和疲劳强度等。

#### 一、强度与塑性

强度是指金属抵抗永久变形和断裂的能力。塑性是指金属在力的作用下断裂前产生永久变形的能力。永久变形是指物体在力的作用下产生的形状、尺寸的改变,外力去除后,变形不能恢复到原来的形状和尺寸。永久变形也称为塑性变形。金属材料的强度和塑性指标可以通过拉伸试验测得。

##### (一) 拉伸试验

在工程上,不少机件是受静载荷作用。为了评定这些机件所用金属材料的力学性能,需要进行静载力学性能试验。其中以拉伸试验应用最为广泛。

拉伸试验是指用静拉伸力对试样进行轴向拉伸,测量力和相应的伸长,一般拉至断裂,并测其力学性能的试验。

1. 拉伸试样 拉伸试样的形状通常采用圆柱形试样,试样尺寸按 GB6397—86 金属拉伸试验试样中的有关规定进行制作。试样分为短试样和长试样两种,一般采用短试样。拉伸试样

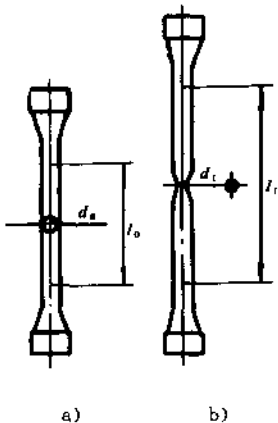


图 2-1 拉伸试样

如图 2-1 所示,图中 2-1a 为标准试样,2-1b 为拉断后的试样。 $d_0$  为标准试样的原始直径; $d_1$  为试样断口处的直径; $l_0$  为标准试样的原始标距; $l_1$  为拉断试样对接后测出的标距长度。长试样  $l_0=10d_0$ ;短试样  $l_0=5d_0$ 。

2. 试验方法 试验在拉伸试验机上进行。图 2-2 为拉伸试验机示意图。将试样 1 装在试验机的上下夹头上,开动机器,在压力油的作用下,试样受到拉伸。同时,记录装置记录下拉伸过程中的力-伸长曲线。

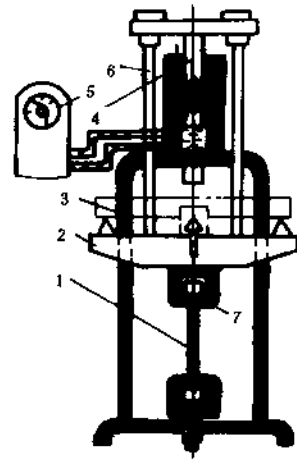


图 2-2 拉伸试验机示意图

### (二)力-伸长曲线

在进行拉伸试验时,载荷  $F$  和试样伸长量  $\Delta L$  之间的关系曲线,称为力-伸长曲线。通常把载荷  $F$  作为纵坐标,伸长量  $\Delta L$  作为横坐标,图 2-3 所示为退火低碳钢的力-伸长曲线图。

观察拉伸试验和力-伸长曲线,会发现在拉伸试验的开始阶段,试样的伸长量  $\Delta L$  与拉伸力  $F$  之间成正比例关系,在力-伸长曲线图中为一条斜直线  $Oe$ 。在该阶段当拉伸力增加时,试样伸长量  $\Delta L$  也呈正比增加。当去除拉伸力后试样伸长变形消失,恢复其原来形状,符合虎克定律,表现为弹性变形。在图中  $F_e$  是试样保持弹性变形的最大拉伸力。

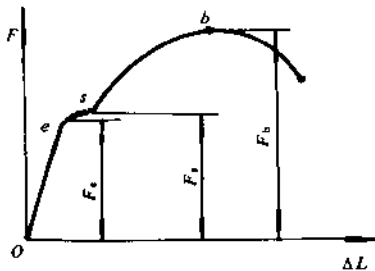


图 2-3 退火低碳钢力-伸长曲线

当拉伸力不断增加,超过  $F_e$  时,试样将产生塑性变形,去除拉伸力后,变形不能完全恢复,塑性伸长将被保留下来。当拉伸力继续增加到  $F_s$  时,力-伸长曲线在  $s$  点后出现一个平台,即在拉伸力不再增加的情况下,试样也会明显伸长,这种现象称为屈服现象。 $F_s$  称为屈服拉伸力。

当拉伸力超过屈服拉伸力后,试样抵抗变形的能力将会增加,此现象为加工硬化,即抗力增加现象。在力-伸长曲线上表现为一段上升曲线。当拉伸力达到  $F_b$  时,试样的局部截面收缩,产生了颈缩现象。由于颈缩使试样局部截面迅速缩小,导致试样被拉断。颈缩现象在力-伸长曲线上表现为一段下降的曲线。 $F_b$  是试样拉断前能承受的最大拉伸力,称为极限拉伸力。

### (三)强度指标

从完整的拉伸试验和力-伸长曲线可以看出,试样从开始拉伸到断裂要经过弹性变形、屈服阶段、加工硬化阶段、颈缩与断裂四个阶段。在力-伸长曲线上各点的纵坐标值表示被测金属材料在不同变形程度抵抗变形的能力,而曲线上各点的横坐标值表示被测金属材料在不同的拉伸力下的变形能力。

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。金属材料的强度指标按承受载荷的类型不同,可分为抗拉强度、抗压强度、抗剪强度、抗扭强度、抗弯强度等。金属材料抵抗拉伸力的强度指标有屈服点和抗拉强度等。

#### 1. 屈服点

屈服点是指试样在拉伸试验过程中力不增加(保持恒定)仍然能继续伸长(变形)时的应力。屈服点用符号  $\sigma_s$  表示。

屈服点  $\sigma_s$  的值可用下式计算:

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0} \quad (\text{N/mm}^2)$$

式中  $F_s$ ——屈服拉伸力, N;

$S_0$ ——试样原始横截面积,  $\text{mm}^2$ 。

屈服点是工程技术上极为重要的力学性能指标之一。因为工程中绝大部分结构件或零件在工作过程中不允许出现塑性变形。例如高压容器的紧固螺栓发生过量塑性变形,就会无法正常工作。因此,  $\sigma_s$  是大多数机械零件选材和设计的依据。

2. 抗拉强度 抗拉强度是指试样拉断前承受的最大拉应力。抗拉强度用符号  $\sigma_b$  表示。  $\sigma_b$  可用下式计算:

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0} \quad (\text{N/mm}^2)$$

式中  $F_b$ ——极限拉伸力, N。

$\sigma_b$  是表征金属材料由均匀塑性变形向局部集中塑性变形过渡的临界值,也是表征材料在静拉伸条件下最大承载能力。对于塑性金属材料来说,拉伸试样在承受最大拉应力  $\sigma_b$  之前,变形是均匀一致的。但超过  $\sigma_b$  后,金属材料开始出现颈缩现象,即产生集中变形。  $\sigma_b$  表示金属材料产生最大均匀变形时的抗力。

抗拉强度  $\sigma_b$  的实际意义有以下几点:

(1) 标志塑性金属材料的实际承载能力。但这种承载能力也仅限于光滑试样单向拉伸的受载。

(2) 脆性金属材料在拉伸试验时,不产生明显的塑性变形,无法测出其  $\sigma_s$ ,因此  $\sigma_b$  是脆性材料制作的机械零件选材和设计的依据。

(3)  $\sigma_b$  与布氏硬度、疲劳强度等之间有一定经验关系。

另外拉伸试验还可以测出材料的弹性极限  $\sigma_e$ ,弹性极限  $\sigma_e$  是指材料保持弹性变形时能承受的最大应力。弹性极限  $\sigma_e$  可用下列公式计算:

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (\text{N/mm}^2)$$

式中  $F_e$ ——弹性变形时的最大拉伸力, N。

#### (四) 塑性指标

金属材料的塑性是指金属断裂前发生塑性变形的能力。可以用拉伸试样断裂时的最大相对变形量来表示塑性指标,如拉伸后的断后伸长率和断面收缩率。它们是工程上广泛使用的表征材料塑性好坏的力学性能指标。

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,如图 2-1 所示。标距的伸长与原始标距的百分比称为伸长率。试样拉断后的标距伸长与原始标距的百分比称为断后伸长率,用符号  $\delta$  表示。  $\delta$  可用下式计算:

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

由于拉伸试样的原始标距  $l_0$  与试样原始直径  $d_0$  之间具有不同比例关系,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  $\delta_{10}$  表示,通常写成  $\delta$ ;使用短试样测定的断后伸长率用符号  $\delta_5$  表示。同一种材料的断后伸长率  $\delta_{10}$  和  $\delta_5$  数值是不相等的,因而不能直接用  $\delta_5$  和  $\delta_{10}$  进行比较。一般短试样  $\delta_5$  大于长试样  $\delta_{10}$ 。

2. 断面收缩率 断面收缩率是指试样拉断后缩颈处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  $\psi$  表示。 $\psi$  值可用下式计算：

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%$$

式中  $S_1$ ——试样断口处的横断面积,  $\text{mm}^2$ 。

金属材料塑性的好坏,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的强度外,还必须有一定的塑性。

塑性指标通常不作为机件设计指标,但因塑性变形有缓和应力集中,削弱应力峰的作用,故可作为安全方面的力学性能指标。

## 二、硬 度

硬度是衡量金属材料软硬程度的一种性能指标。是指金属材料抵抗比它更硬物体压入其表面产生局部变形的能力。

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。即在规定的静态试验力作用下,将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。这种评定方法称为压痕硬度。在压入法中根据载荷、压头和表示方法的不同,常用的硬度指标有布氏硬度(HBS 或 HBW)、洛氏硬度(HRA、HRB、HRC)和维氏硬度(HV)。

### (一)布氏硬度

金属布氏硬度的试验原理是用一定直径的淬火钢球或硬质合金球,以相应的试验力压入试样表面,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,如图 2-4 所示。布氏硬度是指球面压痕单位面积上所承受的平均压力。选择淬火钢球压头时,用符号 HBS;选择硬质合金球压头时,用符号 HBW。

布氏硬度值可用下式进行计算：

$$\text{HBS(HBW)} = 0.102 \times \frac{F}{S} = 0.102 \times \frac{F}{\pi D h}$$

式中  $F$ ——试验力, N;

$S$ ——球冠形压痕面积,  $\text{mm}^2$ ;

$D$ ——压头的直径, mm;

$h$ ——球冠形压痕的高, mm。

在实际试验中,由于球冠形压痕的高测量比较困难,而测量压痕的直径  $d$  比较方便,因此将上式中  $h$  换算成  $d$  的表达式。

$$h = \frac{D}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{D^2 - d^2}$$

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

式中只有  $d$  是变数,试验时只要测量出压痕直径  $d$  (mm),可通过计算或查布氏硬度表即可得出 HBS(HBW) 值。

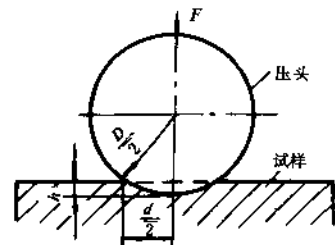


图 2-4 布氏硬度试验原理图

上式布氏硬度计算值一般不标出单位,只写明硬度的数值。

由于金属材料有硬有软,工件有厚有薄,在进行布氏硬度试验时,压头直径 $D$ 、试验力和保持时间应根据被测金属的种类和试验厚度,按表 2-1 中布氏硬度试验规范正确地进行选择。

表 2-1 布氏硬度试验规范

| 材料           | 硬度范围<br>(HBS) | 试样厚度<br>(mm) | $0.102 \times F/D^2$ | 钢球直径<br>(mm)    | 试验力 $F$<br>(kN)  | 试验力保持时间<br>(s) |
|--------------|---------------|--------------|----------------------|-----------------|------------------|----------------|
| 黑色金属         | 140~450       | 6~3          | 30                   | 10              | 29.42(3000 kgf)  | 10             |
|              |               | 4~2          |                      | 5               | 7.355(750 kgf)   |                |
|              |               | <2           |                      | 2.5             | 1.839(187.5 kgf) |                |
| <140         | >6            | 10           | 10                   | 9.807(1000 kgf) | 10               |                |
|              | 6~3           |              | 5                    | 2.452(250 kgf)  |                  |                |
|              | <3            |              | 2.5                  | 612.9(62.5 kgf) |                  |                |
| 铜合金及<br>镁合金  | 36~130        | >6           | 10                   | 10              | 9.807(1000 kgf)  | 30             |
|              |               | 6~3          |                      | 5               | 2.452(250 kgf)   |                |
|              |               | <3           |                      | 2.5             | 612.9(62.5 kgf)  |                |
| 铝合金及<br>轴承合金 | 8~35          | >6           | 2.5                  | 10              | 2.452(250 kgf)   | 60             |
|              |               | 6~3          |                      | 5               | 612.9(62.5 kgf)  |                |
|              |               | <3           |                      | 2.5             | 153.2(15.6 kgf)  |                |

在进行布氏硬度试验选择压头时,HBS 适用于测定布氏硬度值在 450 以下的材料,如灰铸铁、有色金属及经退火、正火和调质处理的钢材等;HBW 适用于测定布氏硬度值在 450~650 之间的材料。我国目前布氏硬度试验常用的压头主要是淬火钢球。

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。除了采用钢球直径  $D$  为 10 mm,试验力为 29.42 kN(3000 kgf),保持时间为 10 s 的试验条件外,在其他条件下试验测得的硬度值,均应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。例如:

150HBS10/1000/30 表示用直径为 10 mm 的淬火钢球在 9.807 kN(1000 kgf)试验力作用下,保持 30 s 测得的布氏硬度值为 150。

500HBW5/750 表示用直径为 5 mm 的硬质合金球,在 7.355 kN(750 kgf)试验力作用下保持 10~15 s 测得的布氏硬度值。一般试验力保持时间为 10~15 s 时不标明。

布氏硬度的特点是试验时金属材料表面压痕大,能在较大范围内反映材料的平均硬度,测得的硬度值也较准确,数据重复性强。但由于压痕大,对金属表面的损伤也较大,不宜测定太小、太薄的试样。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  $\sigma_b$  愈高,硬度值也愈高。HBS 值与  $\sigma_b$  值在一定条件下存在一定的关系,可以近似换算,其经验公式如下:

对于钢:当 HBS > 175 时,  $\sigma_b \approx 3.62 \times \text{HBS}$ ;

当 HBS < 175 时,  $\sigma_b \approx 3.45 \times \text{HBS}$ 。

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

式中 HBS 表示布氏硬度值,  $\sigma_b$  表示抗拉强度值,单位 N/mm<sup>2</sup>。

## (二)洛氏硬度

洛氏硬度试验原理是以锥角为 120° 的金刚石圆锥体或直径为 1.588 mm 的淬火钢球,压入试样表面,如图 2-5 所示。试验时,先加初试验力,然后加主试验力,压入试样表面之后,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材料的硬度大小。

在图 2-5 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。当加上初试验力  $F_0$  后,压头压入试样中,深度为  $h_0$ ,处于 1-1 位置。再加主试验力  $F_1$ ,使压头又压入试样的深度为  $h_1$ ,图中 2-2 位置。然后去除主试验力,保持初试验力。压头因材料的弹性恢复在图中处于 3-3 位置。图中所示  $e$  值,称为残余压痕深度增量,单位为 0.002mm。标尺刻度满量程  $k$  与  $e$  值之差,称为洛氏硬度值。分为 A、B、C 三个标尺。其表示公式为:

$$HR = k - e = k - \frac{\text{压痕深度}}{0.002}$$

式中压痕深度的单位为 mm。

对于由金刚石圆锥压头进行的试验,标尺刻度满量程值为 100,洛氏硬度值为  $100 - e$ 。

对于由淬火钢球压头进行的试验,标尺满刻度值为 130,洛氏硬度值为  $130 - e$ 。

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尺,其试验条件及范围见表 2-2。

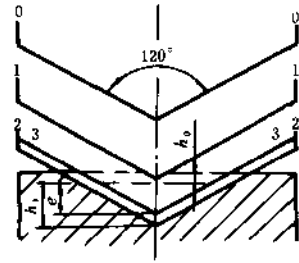


图 2-5 洛氏硬度试验原理图

表 2-2 常用三种洛氏硬度试验规范

| 标尺  | 压头类型        | 总试验力 (N)         | 硬度值有效范围 | 应用                 |
|-----|-------------|------------------|---------|--------------------|
| HRA | 120°金刚石圆锥体  | 588.4(60 kgf)    | 60~85   | 适用测量硬质合金、表面淬火钢或渗碳层 |
| HRB | φ1.588mm 钢球 | 980.7(100 kgf)   | 25~100  | 适用测量有色金属、退火、正火钢等   |
| HRC | 120°金刚石圆锥体  | 1471.07(150 kgf) | 20~67   | 适用淬火钢、调质钢等         |

洛氏硬度的标注方法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。

根据 GB/T230—91 规定,硬度数值写在符号的前面,HR 后面写使用的标尺。如 50HRC 表示用 HRC 标尺测定的洛氏硬度值为 50。

洛氏硬度试验是生产中广泛应用的一种硬度试验方法。其特点是:硬度试验压痕小,对试样表面损伤小,常用来直接检验成品或半成品的硬度;试验操作简便,可以直接从试验机上显示出硬度值,省去了繁琐的测量、计算和查表等工作。但是,由于压痕小,硬度值的准确性不如布氏硬度,数据重复性差。因此在测试洛氏硬度时,要选取不同位置的三点测出硬度值,再计算平均值作为被测材料的硬度值。

### (三)维氏硬度

布氏硬度试验不适合测定硬度较高的材料;洛氏硬度试验虽可用来测定各种金属材料的硬度,但采用了不同的压头和总试验力,标尺不同,硬度值彼此没有联系,也不能直接换算。因此,为了从软到硬对各种金属材料进行连续一致的硬度标度,制定了维氏硬度试验法。

维氏硬度的测定原理与布氏硬度基本相似,如图 2-6 所示。将相对面夹角为  $136^\circ$  的正四棱锥体金刚石做为压头,以选定的试验力(49.03~98.07N)压入试样表面,经规定保持时间后,去除试验力,则试样表面上压出一个四方锥形的压痕,测量压痕两对角线的平均长度,计算硬度值。维氏硬度是用正四棱锥形压痕单位表面积上承受的平均压力表示的硬度值。用符号 HV 表示,计算式如下:

$$HV = 0.1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (\text{N/mm}^2)$$

式中  $F$ —— 试验力, N;

$d$ —— 压痕两条对角线长度算术平均值, mm。

试验时,用测微计测出压痕的对角线长度,算出两对角线长度的平均值后,经查表就可计算出维氏硬度值。

维氏硬度的测量范围在  $5 \sim 1000\text{HV}$ 。标注方法与布氏硬度相同。硬度数值写在符号的前面,试验条件写在符号的后面。对于钢及铸铁的试验力保持时间为  $10 \sim 15\text{ s}$  时,可以不标出。例如:

$640\text{HV}_{30}$  表示用  $294.2\text{ N}(30\text{ kgf})$  试验力保持  $10 \sim 15\text{ s}$  测定的维氏硬度值为  $640$ 。

$640\text{HV}_{30/20}$  表示用  $294.2\text{ N}(30\text{ kgf})$  试验力保持  $20\text{ s}$  测定的维氏硬度值为  $640$ 。

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,尤其适用于零件表面层硬度的测量。如化学热处理的渗层硬度测量,其结果精确可靠。但维氏硬度值需要测量对角线长度,然后查表或计算,而且试样表面的质量要求高,所以,测量效率较低,没有洛氏硬度方便,不适用于大批量生产,不适合测量组织不均匀的材料(如灰铸铁的硬度)。

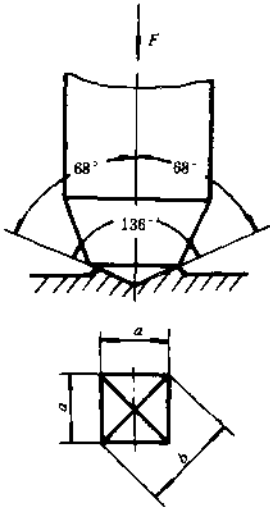


图 2-6 维氏硬度试验原理图

#### (四)硬度的应用

硬度试验和拉伸试验都是在静载荷下测定材料的力学性能的方法。硬度试验由于其基本上不损伤试样,又简便迅速,不需要制作专门试样,而且可以直接在工件上进行测试,因而在生产中被广泛地应用。而拉伸试验虽能准确地测出材料的强度、塑性,但属于破坏性试验,因而在生产中不如硬度试验应用广泛。硬度是一项综合力学性能指标,从金属表面的局部压痕可以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。硬度值的高低,对于机械零件的耐磨性有很大影响。物体表面相接触并作相对运动时,材料的表面会逐渐磨损以致损伤表面,耐磨性是材料抵抗磨损的一种性能指标,可用磨损量来表示。显然,钢的硬度值愈高,其耐磨性亦愈高。

### 三、冲击韧性

前面讨论的强度、塑性、硬度等力学性能指标都是在静载荷作用下测定的。可是有些零件,在工作过程中受到的是动载荷。例如锻锤的锤杆、冲床的冲头等。动载荷,特别是冲击载荷比静载荷的破坏性要大得多。因此需要制定冲击载荷下的性能指标,即韧性指标。金属在断裂前吸收变形能量的能力,称为韧性。为了测定金属材料的韧性,通常采用夏比冲击试验方法。

#### (一)夏比冲击试验

1. 试验原理 夏比冲击试验通常是在摆锤式冲击试验机上进行。试验时,将带有缺口的标准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 2-7 所示。将一定质量的摆锤升高到  $h_1$ ,则摆锤具有位能  $A_{k_{01}}$  (U 形缺口试样)。当摆锤落下,将试样冲断后,摆锤继续向前升高到  $h_2$ ,此时摆锤的剩余位能  $A_{k_{02}}$ 。摆锤冲断试样所失去的位能是:

$$A_{ku} = A_{k_{01}} - A_{k_{02}} (\text{J})$$



$A_{ku}$ 就是试样在一次冲击试验作用下折断时所吸收的功,称为冲击吸收功。 $A_{ku}$ 可以从试验机的刻度盘上直接读出。

冲断试样时,冲击试样缺口底部每单位横断面积上的冲击吸收功,称为冲击韧度。它是表征金属材料冲击韧性的主要判据。用符号  $a_{ku}$ 表示,计算式如下:

$$a_{ku} = \frac{A_{ku}}{S} = \frac{A_{ku1} - A_{ku2}}{S} \text{ (J/cm}^2\text{)}$$

式中  $A_{ku}$ ——冲击吸收功, J;

$S$ ——试样缺口底部横断面积,  $\text{cm}^2$ 。

显然,冲击韧度  $a_{ku}$ 愈大,表示材料抵抗冲击试验力而不破坏的能力愈强。

冲击韧度是评定金属材料力学性能的重要判据。但是,影响冲击韧度的因素很多,如试样的形状、表面粗糙度、内部组织状态等。因测定数据的重复性差,目前冲击韧度尚不能直接用于强度计算,只作为设计时的参考指标。冲击韧度对组织缺陷非常敏感,它可灵敏地反映材料质量、宏观缺口和显微组织的差异,能有效地检验金属材料在冶炼、加工、热处理工艺等方面的质量。此外,冲击韧度对温度非常敏感,通过一系列温度下的冲击试验可测出材料的脆化趋势和韧脆转变温度。

2. 冲击试样 为了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,如图 2-8 所示。带 U 形缺口的试样,称为夏比 U 形缺口试样;带 V 形缺口的试样,称为夏比 V 形缺口试样。使用 V 形缺口试样进行冲击试验时,相应的冲击吸收功,冲击韧度分别用符号  $A_{kv}$ 、 $a_{kv}$ 表示。

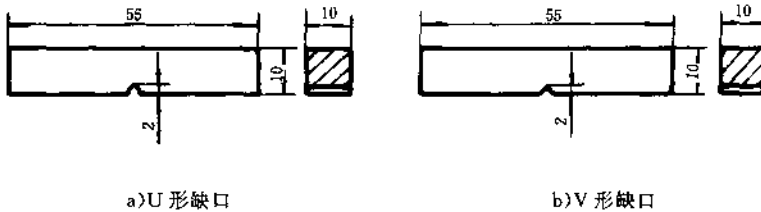


图 2-8 冲击试样

在试样上开缺口的作用是:在缺口附近造成应力集中,使塑性变形局限在缺口附近,并保证在缺口处发生破断,以便正确测定材料承受冲击载荷的能力。同一种材料的试样缺口愈深、愈尖锐,塑性变形的体积愈小,冲击吸收功愈小,材料表现脆性愈显著。因此,不同类型的冲击试样,测定出的冲击韧度不能直接比较。V 形缺口试样比 U 形缺口试样更容易冲断,因而其冲击韧度也较小。

对于球墨铸铁和工具钢等脆性材料,为了特殊目的,进行冲击试验时,也可采用不带缺口的冲击试样。

3. 冲击吸收功-温度关系曲线 冲击吸收功与试验温度有关。有些材料在室温时并不显示脆性,而在较低温度下,则可能发生脆断。冲击吸收功与温度之间的关系曲线如图 2-9 所示。对于具有低温脆性的材料,曲线上具有上平台区、过渡区和下平台区三部分。

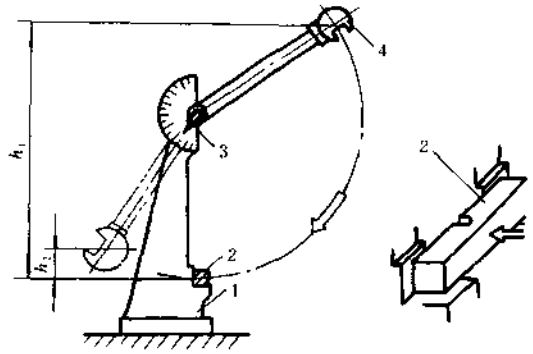


图 2-7 夏比冲击试验原理图

1—固定支座;2—带缺口的试样;3—指针;4—摆锤