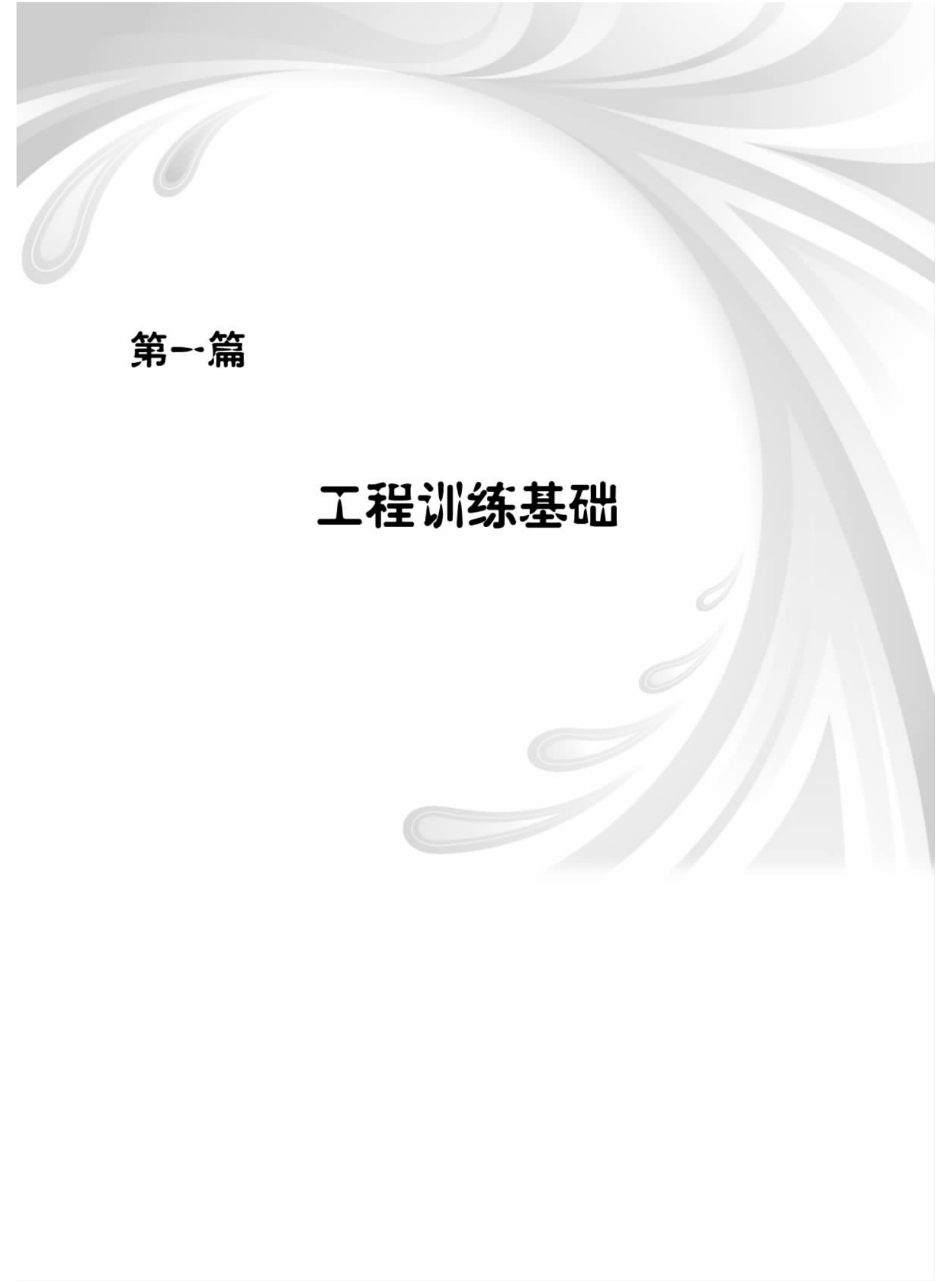




第一篇

工程训练基础



工程材料基础

1.1 工程材料概述

翻开人类文明史,不难发现,材料的开发、使用和完善贯穿始终。从天然材料的使用到陶器和青铜器的制造,从钢铁冶炼到材料合成,人类成功地制造出满足自身需求的材料,进而走出深山、洞穴,奔向茫茫平原和辽阔海洋,飞向广袤的太空。

人类社会的发展历史证明,材料是人类生产与生活的物质基础,是社会进步与发展的前提。当今社会,材料、信息和能源技术已构成了人类现代社会大厦的三大支柱,而且能源和信息的发展都离不开材料,所以世界各国都把研究、开发新材料放在突出的地位。

材料是人类社会可接受、能经济地制造有用器件(或物品)的固体物质。工程材料是在各工程领域中使用的材料。工程上使用的材料种类繁多,有许多不同的分类方法,按化学成分、结合键的特点,可将工程材料分为金属材料、非金属材料 and 复合材料三大类,见表 1-1。

表 1-1 工程材料分类

金 属 材 料		非金属材料			复 合 材 料
黑色金属材料	有色金属材料	无机非金属材料	有机高分子材料		
碳素钢、合金钢、铸铁等	铝、镁、铜、锌及其合金等	水 泥、陶 瓷、玻璃等	合 成 高 分 子材料（塑料、合成纤维、合成橡胶等）	天然高分子材料（木材、纸、纤维、皮革等）	金属基复合材料、塑料基复合材料、橡胶基复合材料、陶瓷基复合材料等

金属材料可分为黑色金属材料 and 有色金属材料。黑色金属材料主要是铁基金属合金,包括碳素钢、合金钢、铸铁等;有色金属材料包括轻金属及其合金、重金属及其合金等。而非金属材料可分为无机非金属材料 and 有机高分子材料。无机非金属材料包括水泥、陶瓷、玻璃等,有机高分子材料包括塑料、橡胶及合成纤维等。上述两种或两种以上材料经人工合成后,获得的优于组成材料特性的材料称为复合材料。

工程材料按照用途可分为两大类,即结构材料 and 功能材料。结构材料通常指工程上对硬度、强度、塑性及耐磨性等力学性能有一定要求的材料,主要包括金属材料、陶瓷材料、高分子材料及复合材料等。功能材料是指具有光、电、磁、热、声等功能和效应的材料,包括半导体材料、磁性材料、光学材料、电解质材料、超导体材料、非晶和微晶材料、形状记忆合金等。

工程材料按照应用领域还可分为信息材料、能源材料、建筑材料、生物材料和航空材料



等多种类别。

1.2 金属材料

金属材料是人们最为熟悉的一种材料,机械制造、交通运输、建筑、航天航空、国防与科学技术等各个领域都需要使用大量的金属材料,因此,金属材料在现代工农业生产中占有极其重要的地位。

金属材料是由金属元素或以金属元素为主、其他金属或非金属元素为辅构成的,并具有金属特性的工程材料。金属材料品种繁多,工程上常用的金属材料主要有黑色及有色金属材料等。

黑色金属材料中使用最多的是钢铁。钢铁是世界上的头号金属材料,年产量高达数亿吨。钢铁材料广泛用于工农业生产及国民经济各部门。例如,各种机器设备上大量使用的轴、齿轮、弹簧,建筑上使用的钢筋、钢板,以及交通运输中的车辆、铁轨、船舶等都要使用钢铁材料。通常所说的钢铁是钢与铁的总称。实际上钢铁材料是以铁为基体的铁-碳合金,当碳的质量分数大于 2.11% 时称为铁,当碳的质量分数小于 2.11% 时称为钢。

为了改善钢的性能,人们常在钢中加入硅、锰、铬、镍、钨、钼及钒等合金元素。它们各有各的作用,有的提高强度,有的提高耐磨性,有的提高抗腐蚀性能,等等。在冶炼时有目的地向钢中加入合金元素就形成了合金钢。合金钢中合金元素含量虽然不多,但具有特殊的作用,就像炒菜时放入少量的味精一样,含量不多但味道鲜美。合金钢种类很多,按照性能与用途不同,合金钢可分为合金结构钢、合金工具钢、不锈钢、耐热钢、超高强度钢等。

人们可以按照生产实际提出的使用要求,加入不同的合金元素而设计出不同的钢种。例如,切削工具要求硬度及耐磨性较高,在切削速度较快、温度升高时其硬度不降低。按照这样的使用要求,人们就设计了一种称为高速工具钢的刀具材料,其中含有钨、钼、铬等合金元素。普通钢容易生锈,化工设备及船舶壳体等的损坏都与腐蚀有关。据不完全统计,全世界因腐蚀而损坏的金属构件约占总产量的 10%。人们经过大量试验发现,在钢中加入 13% 的铬元素后,钢的抗蚀性能显著提高,如在钢中同时加入铬和镍,还可以形成具有新的显微组织的不锈钢,于是人们设计出了一种能够抵抗腐蚀的不锈钢。

有色金属包括铝、铜、钛、镁、锌、铅及其合金等,虽然它们的产量及使用量不如钢铁材料多,但由于具有某些独特的性能和优点,从而成为当代工业生产中不可缺少的材料。

由于金属材料的历史悠久,因而在材料的研究、制备、加工以及使用等方面已经形成了一套完整的系统,拥有一整套成熟的生产技术和巨大的生产能力,并且经受住在长期使用过程中各种环境的考验,具有稳定可靠的质量,以及其他任何材料不能完全替代的优越性能。金属材料的另一个突出优点是性价比较高,在所有的材料中,除了水泥和木材外,钢铁是最便宜的材料,它的使用可谓量大面广。由于金属材料具有成熟稳定的工艺,大规模的现代化装备以及高性价比,因而具有强大的生命力,在国民经济中占有极其重要的位置。

此外,为了适应科学技术的高速发展,人们还在不断推陈出新,进一步发展新型的、高性能的金属材料,如超高强度钢、高温合金、形状记忆合金、高性能磁性材料以及储氢合金等。

1. 碳素钢

碳素钢是指碳的质量分数小于 2.11% 并含有少量硅、锰、硫、磷等杂质元素的铁-碳合

金,简称碳钢。其中锰、硅是有益元素,对钢有一定强化作用;硫、磷是有害元素,会分别增加钢的热脆性和冷脆性,应严格控制。碳钢的价格低廉,工艺性能良好,在机械制造中应用广泛。常用碳钢的牌号及用途见表 1-2。

表 1-2 常用碳钢的牌号及用途

名称	牌号	应用举例	说 明
碳素结构钢	Q215A 级	承受载荷不大的金属结构件,如薄板、铆钉、垫圈、地脚螺栓及焊接件等	碳素钢的牌号是由代表钢材屈服点的汉语拼音的第一个字母“Q”、屈服点(强度)值(MPa)、质量等级符号、脱氧方法四个部分组成。其中质量等级共分四级,分别以 A、B、C、D 表示
	Q235A 级	金属结构件、钢板、钢筋、型钢、螺母、连杆、拉杆等,Q235C 级、Q235D 级可用作重要的焊接结构	
优质碳素结构钢	15	强度低,塑性好,一般用于制造受力不大的冲压件,如螺栓、螺母、垫圈等。经过渗碳处理或氧化处理可用作表面要求耐磨、耐腐蚀的机械零件,如凸轮、滑块等	牌号的两位数字表示平均含碳量的万分数,45 钢即表示平均碳的质量分数为 0.45%。含锰量较高的钢,须加注化学元素符号 Mn ^①
	45	综合力学性能和切削加工性能均较好,用于强度要求较高的重要零件,如曲轴、传动轴、齿轮、连杆等	
碳素铸钢	ZG200—400	有良好的塑性、韧性和焊接性能,用于受力不大、要求韧性好的各种机械零件,如机座、变速箱壳等	ZG 代表铸钢,其后第一组数字为屈服点(MPa),第二组数字为抗拉强度(MPa)。ZG200—400 表示屈服强度为 200MPa、抗拉强度为 400MPa 的碳素铸钢

2. 合金钢

为了改善和提高钢的性能,在碳钢的基础上加入其他合金元素的钢称为合金钢。常用的合金元素有硅、锰、铬、镍、钨、钼、钒、稀土元素等。合金钢还具有耐低温、耐腐蚀、高磁性、高耐磨性等良好的特殊性能,它在工具或力学性能、工艺性能要求高的、形状复杂的大截面零件或有特殊性能要求的零件方面,得到了广泛应用。常用合金钢的牌号、性能及用途见表 1-3。

表 1-3 常用合金钢的牌号、性能及用途

种 类	牌 号	性能及用途
普通低合金结构钢	9Mn2、10MnSiCu、16Mn、15MnTi	强度较高,塑性良好,具有良好的焊接性和耐蚀性,用于建造桥梁、车辆、船舶、锅炉、高压容器、电视塔等
渗碳钢	20CrMnTi、20Mn2V、20Mn2TiB	心部的强度较高,用于制造重要的或承受重载荷的大型渗碳零件

① 含碳量表示碳的质量分数,含锰量表示锰的质量分数,余同。

续表

种 类	牌 号	性能及用途
调质钢	40Cr、40Mn2、30CrMo、40CrMnSi	具有良好的综合力学性能(高的强度和足够的韧性),用于制造一些复杂的重要机器零件
弹簧钢	65Mn、60Si2Mn、60Si2CrVA	淬透性较好,热处理后组织可得到强化,用于制造承受重载荷的弹簧
滚动轴承钢	GCr4、GCr15、GCr15SiMn	用于制造滚动轴承的滚珠、套圈

3. 铸铁

碳的质量分数大于 2.11% 的铁-碳合金称为铸铁。由于铸铁含有的碳和杂质较多,其力学性能比钢差,不能锻造。但铸铁具有优良的铸造性、减振性及耐磨性等特点,加之价格低廉,生产设备和工艺简单,是机械制造中应用最多的金属材料。据资料表明,铸铁件占机器总质量的 45%~90%。常用铸铁的牌号、用途见表 1-4。

表 1-4 常用铸铁的牌号、应用及说明

名称	牌 号	应用举例	说 明
灰铸铁	HT150	用于制造端盖、泵体、轴承座、阀壳、管子及管路附件、手轮,一般机床底座、床身、滑座、工作台等	“HT”为“灰铁”两字汉语拼音的字头,后面的一组数字表示 $\phi 30$ 试样的最低抗拉强度。如 HT200 表示灰铸铁的抗拉强度为 200MPa
	HT200	用于承受较大载荷和较重要的零件,如汽缸、齿轮、底座、飞轮、床身等	
球墨铸铁	QT400—18 QT450—10 QT500—7 QT800—2	广泛用于机械制造业中受磨损和受冲击的零件,如曲轴(一般用 QT500—7)、齿轮(一般用 QT450—10)、汽缸套、活塞环、摩擦片、中低压阀门、千斤顶座、轴承座等	“QT”为球墨铸铁的代号,后面的数字表示最低抗拉强度和最低伸长率。如 QT500—7 即表示球墨铸铁的抗拉强度为 500MPa,伸长率为 7%
可锻铸铁	KTH300—06 KTH330—08 KTZ450—06	用于受冲击、振动等零件,如汽车零件、机床附件(如扳手)、各种管接头、低压阀门、农具等	“KTH”“KTZ”分别为黑心和珠光体可锻铸铁的代号,后面的数字分别代表最低抗拉强度和最低伸长率

4. 有色金属及其合金

有色金属的种类繁多,虽然产量和使用不及黑色金属,但由于其具有的某些特殊性能,已成为现代工业中不可缺少的材料。常用有色金属及其合金的牌号、应用及说明见表 1-5。

表 1-5 常用有色金属及其合金的牌号举例、应用及说明

名称	牌号	应用举例	说 明
纯铜	T1	电线、导电螺钉、储藏器及各种管道等	纯铜分 T1~T4 四种。如 T1(一号铜)铜的质量分数为 99.95%,T4 铜的质量分数为 99.50%
黄铜	H62	散热器、垫圈、弹簧、各种网、螺钉及其他零件等	“H”表示黄铜,后面数字表示铜的质量分数,如 62 表示铜的质量分数为 60.5%~63.5%

续表

名称	牌号	应用举例	说明
纯铝	1070A 1060 1050A	电缆、电气零件、装饰件及日常生活用品等	铝的质量分数为 98%~99.7%
铸铝合金	ZL102	耐磨性中上等,用于制造载荷不大的薄壁零件等	“Z”表示铸,“L”表示铝,后面数字表示顺序号。如 ZL102 表示 Al-Si 系 02 号合金

5. 金属材料的性能

金属材料的性能分为使用性能和工艺性能,具体说明见表 1-6。

表 1-6 金属材料的性能

性能名称		性能内容	
使用性能	物理性能	包括密度、熔点、导电性、导热性及磁性等	
	化学性能	指金属材料抵抗各种介质的侵蚀能力,如抗腐蚀性能等	
	力学性能	强度	在外力作用下材料抵抗变形和破坏的能力,分为抗拉强度 σ_b 、抗压强度 σ_{bc} 、抗弯强度 σ_{bb} 及抗剪强度 τ_b ,单位均为 MPa
		硬度	衡量材料软硬程度的指标,较常用的硬度测定方法有布氏硬度(HBS,HBW)、洛氏硬度(HR)和维氏硬度(HV)等
		塑性	在外力作用下材料产生永久变形而不发生破坏的能力,常用指标是断后伸长率 δ_5 、 δ_{10} (%)和断面收缩率 ψ (%)。 δ 和 ψ 越大,材料塑性越好
		冲击韧度	指材料抵抗冲击力的能力,常把各种材料受到冲击破坏时,消耗能量的数值作为冲击韧度的指标,用 α_K 表示。冲击韧度值主要取决于塑性、硬度,尤其是温度对冲击韧度值的影响更具有重要的意义
疲劳强度	材料在多次交变载荷作用下而不至引起断裂的最大应力		
工艺性能		包括热处理工艺性能、铸造性能、锻造性能、焊接性能及切削加工性能等	

1.3 硬 度

硬度是指材料抵抗比它更硬的物体压入其表面的能力,即受压时抵抗局部塑性变形的能力。硬度是衡量金属软硬的判据。机械制造业所用的刀具、量具等必须具备足够的硬度,才能保证使用性能的要求。一些重要的机械零件如轴承、齿轮等也必须具备一定的硬度才能正常使用。

硬度试验操作简单、迅速,不一定要用专门的试样,且不破坏零件,根据测得的硬度值还能估计金属材料的近似强度值,因而被广泛使用。硬度还影响到材料的耐磨性,一般情况下金属的硬度越高,耐磨性也越高。目前生产中采用的硬度试验方法主要有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等。

1.3.1 布氏硬度

1. 布氏硬度试验的基本原理

图 1-1(a)所示为布氏硬度测试原理的示意图,用直径为 D 的钢球或硬质合金球作压头,在压力 P 作用下压入试样表面,经规定的保持时间后,卸除压力,测量压痕直径 d 。根据压力压痕的平均直径(见图 1-1(b)),用下式可求出布氏硬度值:

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

式中: P ——压力, N;

D ——球体直径, mm;

d ——压痕平均直径, mm。

从上式可以看出,当压力 P 和球体直径一定时,压痕直径 d 越小,则布氏硬度值越大,也就是硬度越高。布氏硬度的单位为 MPa,但习惯上不予标出。在实际应用中,布氏硬度值一般不用计算方法求得,而是先测出压痕直径 d ,然后从专门的硬度表中查得相应的布氏硬度值。

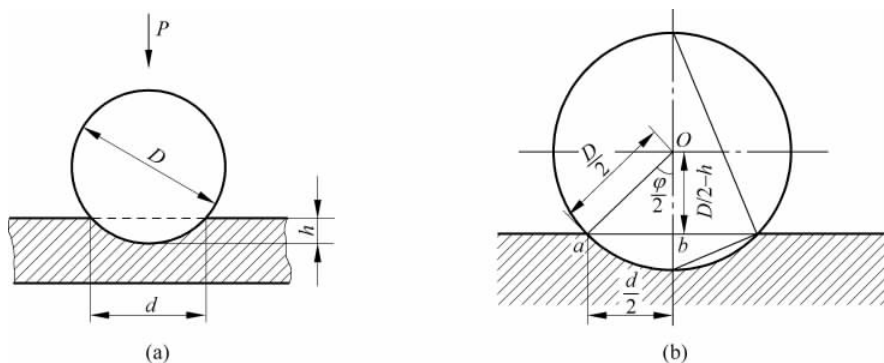


图 1-1 布氏硬度测试原理

(a) 原理图; (b) h 和 d 的关系

压头为钢球时用 HBS,适用于布氏硬度值在 450 以下的材料;压头为硬质合金球时用 HBW,适用于布氏硬度值在 650 以下的材料。表示布氏硬度值时,在符号 HBS 或 HBW 前的数字为硬度值,符号后按一定顺序用数字表示试验条件(球体直径、压力大小和保持时间等)。如 160HBS10/1000/30 表示用直径 10mm 的钢球在 1000kgf^① 压力作用下保持 30s 测得的布氏硬度为 160。当保持时间为 10~15s 时,不标注。

2. 布氏硬度试验机的结构和操作

布氏硬度试验主要用于组织不均匀的锻钢和铸铁的硬度测试。锻钢和灰铸铁的布氏硬度与拉伸试验有着较好的对应关系。

^① 1kgf=9.80665N。

HB—3000 型布氏硬度试验机的外形结构如图 1-2 所示。其主要部件及作用说明如下：

(1) 机体与工作台：铸铁机体，在机体前台面上安装了丝杠座，其中装有丝杠 5，丝杠上装有立柱 4 和工作台 3，可上下移动。

(2) 杠杆机构：杠杆系统通过电动机将载荷自动加在试样上。

(3) 压轴部分：用以保证工作时试样与压头中心对准。

(4) 减速器部分：带动曲柄及曲柄连杆，在电机转动及反转时，将载荷加到压轴上或从压轴上卸除。

(5) 换向开关系统：用于控制电机回转方向，使加、卸载荷自动进行。

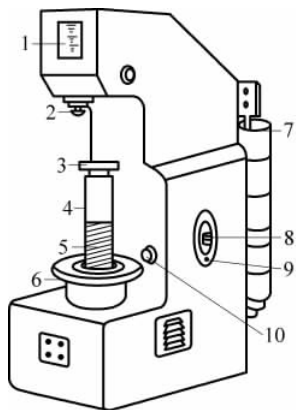


图 1-2 HB—3000 型布氏硬度试验机
外形结构图

1—指示灯；2—压头；3—工作台；4—立柱；
5—丝杠；6—手轮；7—载荷砝码；8—压紧螺钉；
9—时间定位器；10—加载按钮

1.3.2 洛氏硬度

1. 洛氏硬度试验的基本原理

洛氏硬度试验与布氏硬度试验不同，它采用测量压痕深度的方法来确定材料的硬度值。洛氏硬度的测量原理如图 1-3 所示。在初始试验力 F_0 和总试验力 $F_0 + F_1$ 的先后作用下，将顶角为 120° 的金刚石圆锥体或直径为 1.588mm 的淬火钢压入试样表面，经规定保持时间后，卸除主试验力，用测得的残余压痕深度增量来计算洛氏硬度值。

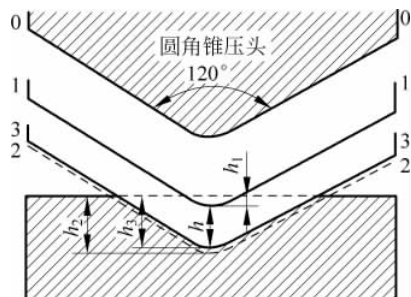


图 1-3 洛氏硬度试验原理图

图 1-3 中，0—0 为压头未与试样接触时的位置；1—1 为压头受到初始试验力 F_0 后压入试样的位置；2—2 为压头受到总试验力 $F_0 + F_1$ 后压入试样的位置；经规定的保持时间后，卸除主试验力 F_1 ，仍保持初始试验力 F_0 ，由于试样弹性变形的恢复使压头上升到 3—3 的位置。此时压头受主试验力作用压入深度为 h ，即 1—1 至 3—3 的位置。 h 值越小，则金属硬度越高。为了与习惯上数值越大硬度越高的概念相一致，采用一常数 K 减去 $h_3 - h_1$ 的差值来表示硬度值。

为简便起见，又规定每 0.002mm 压入深度作为一个硬度单位（即刻度盘上一小格）。洛氏硬度值的计算公式为

$$HR = \frac{K - (h_3 - h_1)}{0.002}$$

式中： h_1 ——预加载荷压入试样的深度，mm；

h_3 ——卸除主载荷后压入试样的深度，mm；

K ——常数,采用金刚石圆锥压头时 $K=0.2$ (用于 HRA、HRC),采用淬火钢球压头时 $K=0.26$ (用于 HRB)。

因此上式可改写为

$$\text{HRC(或 HRA)} = 100 - \frac{h_3 - h_1}{0.002}, \quad \text{HRB} = 130 - \frac{h_3 - h_1}{0.002}$$

由此可见,洛氏硬度值是一个无量纲的材料性能指标,硬度值在试验时直接从硬度计的表盘上读出。

2. 洛氏硬度试验机的结构和操作

H—100 型杠杆式洛氏硬度试验机的结构如图 1-4 所示,其主要部分及作用如下:

(1) 机体及工作台: 铸铁机体,在机体前面安装有不同形状的工作台 5。通过手轮 7 的转动,借助螺杆 6 的上下移动从而使工作台上升或下降。

(2) 加载机构: 由加载杠杆 10(横杆)及挂重架 11(纵杆)等组成,通过杠杆系统将载荷传至压头 3 而压入试样 4,借扇形齿轮 18 的转动可完成加载和卸载任务。

(3) 千分表指示盘: 通过刻度盘指示各种不同的硬度值(见图 1-5)。

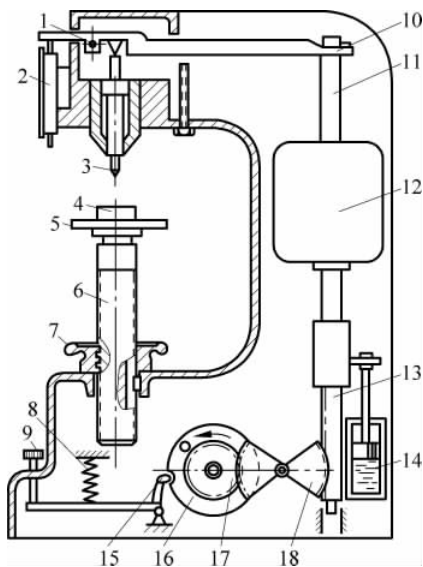


图 1-4 H—100 型洛氏硬度试验机结构图

- 1—支点; 2—指示器; 3—压头; 4—试样; 5—工作台; 6—螺杆;
7—手轮; 8—弹簧; 9—按钮; 10—横杆; 11—纵杆; 12—重锤;
13—齿轮; 14—油压缓冲器; 15—插销; 16—转盘; 17—小齿轮;
18—扇形齿轮

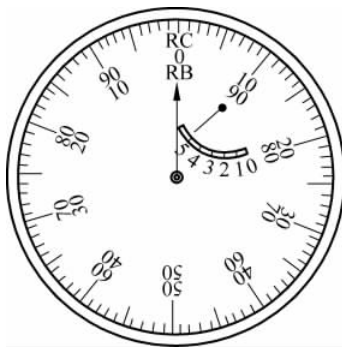


图 1-5 千分表指示盘

国家标准 GB/T 230—1991 规定,洛氏硬度用符号 HR 表示,根据压头和试验力的不同,共有 9 种标尺,常用的有 HRA、HRB、HRC 三种。这三种洛氏硬度的压头、负荷及使用范围列于表 1-7。