

新世纪高等职业教育规划教材

*Jinshu Gongyixue*

# 金属工艺学

主 编 郭卫凡 李其钊

*Jinshu Gongyixue*

China University of Mining and Technology Press

中国矿业大学出版社

新世纪高等职业教育规划教材

# 金属工艺学

主编 郭卫凡 李其钊

中国矿业大学出版社

# 前 言

本书是根据高等职业技术学院的特点而编写的一本专业技术基础课教材,也可作为机械工程技术人员的参考用书。

本书重点突出实用性,力求内容精炼、重点突出、深入浅出,减少理论分析,加强应用技能训练,同时介绍了一些新的工艺方法和知识,并采用最新的国家标准,符合高职“实用性”的教学要求。

参加本书编写的有:李其钊(第一、二、五、六章)、王桃芬(绪论、第三章)、李宏(第四、七章)、康力(第八、十二章)、郭卫凡(第九、十、十一章)、贺义宗(第十三、十四、十五、十六章)。

本书在编写过程中得到中国矿业大学及其他兄弟院校有关人士的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免有缺点和错误,恳切希望广大读者批评指正。

编 者

2005.9

# 目 录

|                |    |
|----------------|----|
| 绪论             | 1  |
| 第一章 金属材料的机械性能  | 3  |
| 第一节 强度和塑性      | 3  |
| 第二节 硬度         | 5  |
| 第三节 冲击韧性与金属疲劳  | 11 |
| 思考题            | 13 |
| 第二章 金属和合金的晶体结构 | 15 |
| 第一节 金属的晶体结构    | 15 |
| 第二节 金属的结晶      | 18 |
| 第三节 合金的晶体结构    | 21 |
| 思考题            | 24 |
| 第三章 铁碳合金相图     | 26 |
| 第一节 铁碳合金的基本组织  | 26 |
| 第二节 铁碳合金状态图    | 27 |
| 第三节 碳钢         | 33 |
| 思考题            | 38 |
| 第四章 钢的热处理      | 39 |
| 第一节 概述         | 39 |
| 第二节 钢在加热时的组织转变 | 40 |
| 第三节 钢在冷却时的组织转变 | 42 |
| 第四节 钢的普通热处理    | 45 |
| 第五节 钢的表面热处理    | 54 |
| 第六节 热处理新工艺简介   | 60 |
| 思考题            | 62 |
| 第五章 合金钢        | 65 |
| 第一节 合金元素在钢中的作用 | 65 |
| 第二节 合金钢的分类与编号  | 69 |
| 第三节 合金结构钢      | 71 |
| 第四节 合金工具钢      | 79 |
| 第五节 特殊性能钢      | 85 |
| 思考题            | 92 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| <b>第六章 铸铁</b> .....          | 93  |
| 第一节 概述 .....                 | 93  |
| 第二节 灰铸铁 .....                | 95  |
| 第三节 球墨铸铁 .....               | 98  |
| 第四节 其他铸铁简介 .....             | 100 |
| 第五节 铸钢 .....                 | 107 |
| 思考题 .....                    | 109 |
| <b>第七章 有色金属与粉末冶金材料</b> ..... | 110 |
| 第一节 铝及铝合金 .....              | 110 |
| 第二节 铜及其合金 .....              | 117 |
| 第三节 滑动轴承合金 .....             | 122 |
| 第四节 粉末冶金材料 .....             | 125 |
| 第五节 硬质合金 .....               | 128 |
| 思考题 .....                    | 130 |
| <b>第八章 材料表面处理技术</b> .....    | 131 |
| 第一节 金属表面强化处理 .....           | 132 |
| 第二节 金属表面防腐处理 .....           | 139 |
| 第三节 金属表面装饰处理 .....           | 142 |
| 思考题 .....                    | 143 |
| <b>第九章 非金属材料</b> .....       | 144 |
| 第一节 工程塑料的特性、分类与应用 .....      | 144 |
| 第二节 复合材料的特性、分类与应用 .....      | 147 |
| 第三节 其他非金属材料简介 .....          | 149 |
| 思考题 .....                    | 150 |
| <b>第十章 铸造</b> .....          | 151 |
| 第一节 概述 .....                 | 151 |
| 第二节 砂型铸造 .....               | 151 |
| 第三节 合金的铸造性能 .....            | 161 |
| 第四节 铸造工艺设计 .....             | 165 |
| 第五节 铸件结构工艺性 .....            | 170 |
| 第六节 特种铸造 .....               | 175 |
| 思考题 .....                    | 180 |
| <b>第十一章 锻压</b> .....         | 181 |
| 第一节 概述 .....                 | 181 |
| 第二节 金属塑性变形原理 .....           | 184 |
| 第三节 金属坯料的加热与锻件冷却 .....       | 189 |
| 第四节 自由锻造 .....               | 191 |
| 第五节 模型锻造及胎模锻造简介 .....        | 198 |
| 第六节 板料冲压 .....               | 201 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 思考题                      | 208 |
| <b>第十二章 焊接</b>           | 210 |
| 第一节 概述                   | 210 |
| 第二节 手工电弧焊                | 211 |
| 第三节 气焊与气割                | 219 |
| 第四节 其他焊接方法简介             | 223 |
| 第五节 常见金属材料的焊接            | 228 |
| 第六节 常见的焊接缺陷及其产生原因        | 231 |
| 第七节 焊接应力与变形              | 232 |
| 第八节 焊接件的结构工艺性            | 234 |
| 思考题                      | 238 |
| <b>第十三章 金属切削加工的基础知识</b>  | 239 |
| 第一节 金属切削运动与切削要素          | 239 |
| 第二节 切削刀具                 | 242 |
| 第三节 切削过程中的物理现象           | 246 |
| 第四节 工件材料的切削加工性           | 249 |
| 思考题                      | 250 |
| <b>第十四章 金属切削机床及其加工</b>   | 252 |
| 第一节 金属切削机床的分类及型号的编制方法    | 252 |
| 第二节 车床及其加工               | 254 |
| 第三节 钻床、镗床及其加工            | 270 |
| 第四节 铣床及其加工               | 275 |
| 第五节 刨床、插床、拉床及其加工         | 281 |
| 第六节 磨床及其加工               | 285 |
| 第七节 数字程序控制机床及其加工简介       | 293 |
| 思考题                      | 299 |
| <b>第十五章 精密加工与特种加工</b>    | 300 |
| 第一节 精密加工                 | 300 |
| 第二节 特种加工                 | 302 |
| 思考题                      | 307 |
| <b>第十六章 机械加工工艺过程基本知识</b> | 308 |
| 第一节 基本概念                 | 308 |
| 第二节 零件的结构工艺性             | 310 |
| 第三节 机械加工工艺过程             | 311 |
| 思考题                      | 316 |
| <b>附录</b>                | 317 |
| <b>参考文献</b>              | 321 |

## 绪 论

金属工艺学是一门研究常用金属材料的性质及其加工方法的综合性技术基础课。其内容涵盖了金属材料及热处理、铸造、金属压力加工、焊接、金属切削加工等多个学科的基本知识。机械加工生产的过程,就是金属工艺学的应用过程,因此,金属工艺学是工程技术人员必修的技术基础课。金属工艺学是从实践中发展起来的一门学科,它对人类文明的进步起到了推动作用。我国的金属工艺技术有着悠久的发展史。早在原始社会末期,我们的祖先就已经开始使用简单的铜器。到了商代,我国的青铜冶炼与铸造技术达到了相当高的水平。著名的司母戊大铜鼎,是商代晚期的祭祀器具,重达 832.84 kg,其造型精美,鼎外铸出精致的花纹图样,是我国到目前为止出土的最大青铜器,也是世界上迄今发现的最大青铜器。春秋时期,我国就掌握了冶炼技术,并开始使用铸铁农具,这比欧洲国家要早 1 800 多年。战国时期,我国就能运用相当高超娴熟的炼钢、锻造和热处理技术,制造出“干将”、“莫邪”等名剑。埋藏在地下达 2 000 多年的吴王“夫差”剑,出土后仍然熠熠生辉,锋利如初。我国从唐代(约公元 7 世纪)就已经开始使用锡焊和银焊,而欧洲直到 17 世纪才出现这样的钎焊方法。到明朝,我国已经有了多种简易切削加工设备,也有了世界上最早的有关金属加工工艺的文字著作,这就是宋应星所著的《天工开物》,内有冶铁、炼铜、铸钟鼎、锻铁淬火等各种金属加工方法。它内容全面、文字简洁、叙述详尽,是一部比较全面完整地记述金属工艺的科学著作。总之,我国在五千年光辉灿烂的文明史中,在金属工艺学方面取得过辉煌的成就,对人类文明进步做出了举世公认的卓越贡献。但是,由于长期的封建统治,世界列强的残酷掠夺,以及半封建半殖民地反动统治的压迫摧残,我国的科学技术在过去几百年里失去了发展的机会和条件,金属工艺技术和生产力水平长期处于停滞和落后状态。新中国成立后,我国的机械制造业和其他行业一样获得了迅速发展,逐步建立起比较完整的工业生产体系。同样,在金属工艺技术方面也取得了很大发展,许多新材料、新技术、新设备、新工艺在所涉及的各个领域得到广泛应用,并制定出适合我国国情的钢铁标准,建立了符合我国资源特点的合金体系,研究出具有世界先进水平的稀土球墨铸铁、特殊性能合金等新材料,制造出口远洋货轮、内燃机车、机床等机械设备,建造了南京长江大桥、秦山核电站,成功地发射了运载火箭、通信卫星和载人飞船,世界级的三峡工程开工建设。这些足以表明,我国在冶金、铸造、压力加工、焊接、切削加工等金属工艺技术方面达到了很高的水平。但是,我们也应该清醒地认识到,就我国目前的水平与世界先进水平相比较,金属工艺技术仍然存在着一一定的差距,基础工艺技术落后,生产效率低,产品质量有待提高,现代企业管理制度有待完善,先进制造技术有待于大力推广应用。此外,技术创新是金属工艺技术不断发展的根本所在,更有待于大力推广和促进。

金属工艺是工程技术人员在设计、生产制造工作中必需的一门综合性的科学技术。学习本课程的目的和任务,是使学生能够根据机械零部件的要求,合理地选择使用常用金属材料及合理地选择加工方法,并为学习其他有关课程及从事生产技术工作奠定必要的金属工艺学方面的基础。

学习本课程的基本要求是:使学生初步掌握常用金属材料的牌号、成分、组织性能及其应用和一般选用原则;具有初步运用常用热处理方法的能力;了解各种加工方法的基本原理、工艺特点和应用范围;初步了解零件的结构工艺性和加工工艺性;了解各种主要加工方法的常用设备及使用范围;初步掌握选择毛坯和制定零件加工方法的基本知识。

金属工艺学是在长期实践中发展起来的,它具有很强的实践性和应用性。因此,在学习本课程时,不但要学习掌握必要的基础理论和基本知识,还要注意理论联系实际,加强实践教学环节,培养一定的基本操作技能,提高独立分析问题和解决问题的能力,为迎接 21 世纪的新机遇和挑战打下良好的基础。



## 第一章 金属材料的机械性能

金属材料的性能直接关系到金属产品的质量、使用寿命和加工成本,以及生产工人的劳动强度和劳动安全,是产品选材和制订加工工艺方案、生产组织管理的重要依据。

金属材料的性能包括使用性能和工艺性能。使用性能是指金属材料在使用过程中所表现出来的性能,它包括金属材料的力学性能、物理性能(熔点、导电性、导热性、磁性等)、化学性能(耐腐蚀性、抗氧化性等)。工艺性能是指金属材料在各种加工工艺过程中所表现出来的性能,它包括金属材料的铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理工艺性能和切削加工性能等。

金属材料的力学性能又称机械性能,它是指金属材料在外力(即载荷)作用下所表现出的抵抗变形和破坏的能力。金属材料的机械性能包括强度、塑性、硬度、冲击韧性和疲劳强度等,它们是机械零件和构件设计、选材的主要依据。

### 第一节 强度和塑性

#### 一、强度

金属材料在外力(即载荷)作用下抵抗永久变形或断裂的能力称为强度。按外力性质不同,强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗剪强度、抗扭强度和抗弯强度等。在工程上常用来表示金属材料强度的指标有屈服强度和抗拉强度。

##### (一) 拉伸试验

金属材料的屈服强度、抗拉强度和塑性指标是在万能材料试验机上通过对金属材料进行拉伸试验测定的。

金属材料拉伸试验的标准试件如图 1-1 所示。根据国家标准 GB 228—87,标准试件通常分为长试样  $l_0=10d_0$  和短试样  $l_0=5d_0$  两种。 $l_0$  和  $d_0$  值有标准可查,一般  $l_0$  为 100 mm 或 50 mm。

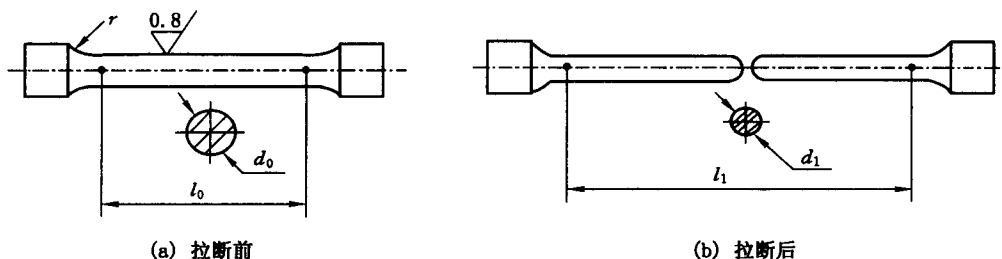


图 1-1 圆形拉伸试样图

试验时,标准试件装夹在万能材料试验机上,缓慢加载拉伸。随着载荷的逐步增加,试件

逐渐伸长,直至试件拉断,试验停止。与此同时,试验机也自动绘成载荷( $F$ )与相应的试件伸长量( $\Delta l$ )的关系曲线图,即拉伸曲线图。如图 1-2 所示为低碳钢材料的拉伸曲线图。由图可知, $F=0$  时, $\Delta l=0$ ,载荷  $F$  增大到  $F_p$  时,试件伸长量  $\Delta l$  成正比例增加。若在此范围内卸除载荷,则试件能完全恢复到原来的形状和尺寸。此时试件处于弹性变形阶段,图线近似一段斜直线。当载荷  $F$  增加超过  $F_e$  后,试件不再成比例伸长。若在此时卸载,则试件不能完全恢复到原来的形状和尺寸,即试件不仅产生了弹性变形,还产生了塑性变形(即永久变形),图线不是一段直线。当载荷  $F$  增加到  $F_s$ ,图线出现水平或锯齿形线段,此时虽然试件继续伸长,但载荷并没有增加,这种现象称为“屈服”。当载荷  $F$  继续增加并超过  $F_s$  后,试件随载荷增加而继续伸长,此时试件已产生较大的塑性变形。当载荷增至最大值  $F_b$  时,试件伸长量  $\Delta l$  迅速增大而横截面将局部迅速减小,这种现象称为“缩颈”。由于“缩颈”处截面的急剧缩小,单位面积承载大大增加,变形更集中于缩颈区。此时,虽然载荷不增加,但“缩颈”区内的变形继续增大,缩颈处截面的直径继续缩小,直到最后试件断裂,图线也结束绘制。

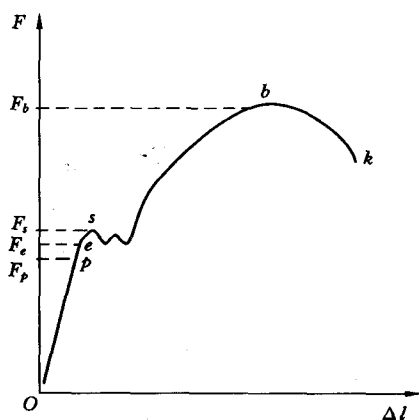


图 1-2 低碳钢材料拉伸曲线示意图

## (二) 强度计算

构件在力的作用下,抵抗永久变形或断裂的能力,既取决于承受的内力大小,又取决于构件的横截面的大小和形状,因此,我们用应力值来衡量构件的强度。我们把单位面积上的抵抗破坏的内力称为应力。轴向拉伸试验应力计算表达式为

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad \text{MPa}$$

式中  $F$ ——试件拉伸时所能承受的内力,试验时内力与载荷相等, N;

$S$ ——试件横截面积,  $\text{mm}^2$ 。

在试验过程中,载荷  $F$  不增加(即保持恒定)试件仍能继续伸长(即变形)处的应力值称为屈服强度(亦称屈服极限),用  $\sigma_s$  表示。由于一些金属材料(例如铸铁、高碳钢、铜、铝等)的屈服现象不明显,测定很困难,因此,国家标准规定,此类材料以产生 0.2% 塑性变形量时的应力值为屈服强度,用  $\sigma_{0.2}$  表示,即

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0} \quad \text{MPa} \quad \sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{S_0} \quad \text{MPa}$$

式中  $F_s$ ——试件屈服时所能承受的最小载荷, N;

$F_{0.2}$ ——试件产生 0.2% 塑性变形量时的载荷, N;

$S_0$ ——试件原始横截面积,  $\text{mm}^2$ 。

试件拉断前所能承受的最大应力值称为抗拉强度(亦称强度极限),用  $\sigma_b$  表示,即

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0} \quad \text{MPa}$$

式中  $F_b$ ——试件断裂前所能承受的最大载荷, N;

$S_0$ ——试件原始横截面面积,  $\text{mm}^2$ 。

金属零件和构件在工作时一般不允许产生明显的塑性变形,因此,设计机械零件时,屈服强度  $\sigma_s$  或规定残余伸长应力  $\sigma_{0.2}$  是机械零件选材和设计的依据。而使用脆性金属材料制作机械零件和构件时,常以抗拉强度  $\sigma_b$  作为选材和设计的依据。

$\sigma_s$  越大,表示金属材料的强度越高,抵抗破坏的能力越强,金属产品的可靠性越好。屈服强度与抗拉强度的比值称为屈强比。屈强比小,构件过载时不会马上断裂,但强度利用率低,材料浪费大,构件成本高。

## 二、塑性

金属材料在外力(即载荷)作用下产生不可逆转的永久变形而不发生断裂的能力称为塑性。常用的塑性指标是断后伸长率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$ ,一般都是通过拉伸试验来测定。

### (一) 断后伸长率

断后伸长率  $\delta$  又称延伸率,是指试件被拉断后,其标距长度的最大伸长量  $\Delta l$  与原始标距  $l_0$  的百分比,即

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

式中  $l_1$ ——试件拉断后的长度,  $\text{mm}$ ;

$l_0$ ——试件原始标距长度,  $\text{mm}$ 。

在拉伸试验前,在试件上刻上两道印痕作为标记,并测量其长度,即为试件原始标距长度  $l_0$ ;当试件拉断后,将其两头尽量对准合拢,再测量原刻线痕迹之间的距离,即为试件拉断后的长度  $l_1$ 。

### (二) 断面收缩率

断面收缩率  $\psi$  是试件被拉断后,“缩颈”断裂处横截面的最大缩减量  $\Delta S$  与原始横截面面积  $S_0$  的百分比,即

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

式中  $S_0$ ——试件原始横截面面积,  $\text{mm}^2$ ;

$S_1$ ——试件拉断后“缩颈”断裂处最小横截面面积,  $\text{mm}^2$ 。

断面收缩率不受试件横截面尺寸大小的影响(断后伸长率受试件长短尺寸影响),可以较确切地反应金属材料的塑性,但试验时必须严格控制测量和计算的误差。

金属材料的断后伸长率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$  的数值越大,表示金属材料的塑性变形能力越强,塑性越好。要想通过压力加工获得形状复杂的金属制品就应选择  $\delta$  与  $\psi$  值大的金属材料。机械零件工作时突然超载,如果材料塑性好,就能先产生塑性变形而不会突然断裂破坏。因此,大多数机械零件,除满足强度要求外,还必须有一定的塑性要求,才能保证工作安全可靠。

碳钢、合金钢、铝、铜等金属材料塑性很好;而铸铁、陶瓷等材料塑性很差,其断后伸长率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$  几乎为零,超载时会突然断裂,使用时必须引起高度注意。工程上一般把  $\delta > 5\%$  的材料称为塑性材料,把  $\delta < 5\%$  的材料称为脆性材料。

## 第二节 硬 度

金属材料抵抗局部变形,特别是局部塑性变形、压痕或划痕的能力称为硬度。它是金属

材料性能的一个综合物理量,表示金属材料在一个较小的体积范围内抵抗塑性变形、弹性变形和破断的能力。

常用的硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等几种。它们是在专门的硬度试验计上测定的。测定工件的硬度不需做专门的试样,可以在工件上直接测定而不损坏工件。

金属材料的硬度对于机器零件的质量有着很大的影响。硬度值越大,则其耐磨性就越好,使用寿命也就越长。材料的硬度对于工具、量具、模具和刀具等的质量影响很大。硬度是生产、生活中广泛应用的力学性能指标之一。

### 一、布氏硬度(HB)

根据 GB 231—84《金属布氏硬度试验方法》,布氏硬度测试原理如图 1-3 所示。布氏硬度的试验方法是:在布氏硬度计上,用一定直径的球体(钢球或硬质合金球)在一定(规定)载荷作用下压入试件表面,保持一定(规定)时间后卸除载荷,测量其压痕直径  $d$ ,计算试件表面压痕单位面积承受的压力,即可确定被测金属材料的硬度值。这种方法测定出来的硬度称为布氏硬度,用 HB 表示。

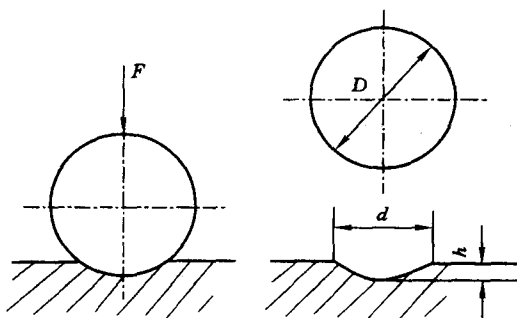


图 1-3 布氏硬度测试原理示意图

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

式中  $F$ ——载荷,即试验力,kgf;

$D$ ——球体直径,即压头直径,mm;

$d$ ——压痕平均直径,mm;

HBS——用淬火钢球压头测定的布氏硬度值;

HBW——用硬质合金球压头测定的布氏硬度值。

在实际测定时,一般并不进行计算,而是用放大镜测量出压痕平均直径后,查表即可直接读出 HB 值。例如,试验力为  $F=29420 \text{ N}$ ,钢球直径  $D=10 \text{ mm}$  时, $0.102F/D^2=30$ ,测得压痕平均直径为  $3.57 \text{ mm}$ ,则查 GB 231—84《金属布氏硬度试验方法》有关硬度数值表(表 1-1 为部分金属布氏硬度数值)得布氏硬度为 290 HB。实际上从有关表格中查到的布氏硬度仍沿用  $\text{kgf/mm}^2$  作为单位,但习惯上不予标出。

表 1-1

金属布氏硬度(HB)数值表

| 压痕直径                             | 布氏硬度值        |     |      | 压痕直径                             | 布氏硬度值        |      |      | 压痕直径                             | 布氏硬度值        |       |       |
|----------------------------------|--------------|-----|------|----------------------------------|--------------|------|------|----------------------------------|--------------|-------|-------|
| $d_{10}$<br>$2d_5$<br>$4d_{2.5}$ | $0.102F/D^2$ |     |      | $d_{10}$<br>$2d_5$<br>$4d_{2.5}$ | $0.102F/D^2$ |      |      | $d_{10}$<br>$2d_5$<br>$4d_{2.5}$ | $0.102F/D^2$ |       |       |
|                                  | 30           | 10  | 2.5  |                                  | 30           | 10   | 2.5  |                                  | 30           | 10    | 2.5   |
| 3.00                             | 415          | 138 | 34.6 | 3.38                             | 325          | 108  | 27.1 | 3.76                             | 260          | 86.8  | 21.7  |
| 3.01                             | 412          | 137 | 34.3 | 3.39                             | 323          | 108  | 26.9 | 3.77                             | 259          | 86.3  | 21.6  |
| 3.02                             | 409          | 136 | 34.1 | 3.40                             | 321          | 107  | 26.7 | 3.78                             | 257          | 85.8  | 21.5  |
| 3.03                             | 406          | 135 | 33.9 | 3.41                             | 319          | 106  | 26.6 | 3.79                             | 256          | 85.3  | 21.3  |
| 3.04                             | 404          | 135 | 33.6 | 3.42                             | 317          | 106  | 26.4 | 3.80                             | 255          | 84.8  | 21.2  |
| 3.05                             | 401          | 134 | 33.4 | 3.43                             | 315          | 105  | 26.2 | 3.81                             | 253          | 84.4  | 21.1  |
| 3.06                             | 398          | 133 | 33.2 | 3.44                             | 313          | 104  | 26.1 | 3.82                             | 252          | 84.0  | 21.0  |
| 3.07                             | 395          | 132 | 33.0 | 3.45                             | 311          | 104  | 25.9 | 3.83                             | 250          | 83.5  | 20.9  |
| 3.08                             | 393          | 131 | 32.7 | 3.46                             | 309          | 103  | 25.8 | 3.84                             | 249          | 83.0  | 20.8  |
| 3.09                             | 390          | 130 | 32.5 | 3.47                             | 307          | 102  | 25.6 | 3.85                             | 248          | 82.6  | 20.6  |
| 3.10                             | 388          | 129 | 32.3 | 3.48                             | 306          | 102  | 25.5 | 3.86                             | 246          | 82.1  | 20.5  |
| 3.11                             | 385          | 128 | 32.1 | 3.49                             | 304          | 101  | 25.3 | 3.87                             | 245          | 81.7  | 20.4  |
| 3.12                             | 383          | 128 | 31.9 | 3.50                             | 302          | 101  | 25.2 | 3.88                             | 244          | 81.3  | 20.3  |
| 3.13                             | 380          | 127 | 31.7 | 3.51                             | 300          | 100  | 25.0 | 3.89                             | 242          | 80.8  | 20.2  |
| 3.14                             | 378          | 126 | 31.5 | 3.52                             | 298          | 99.5 | 24.9 | 3.90                             | 341          | 80.4  | 20.10 |
| 3.15                             | 375          | 125 | 31.3 | 3.53                             | 297          | 98.9 | 24.7 | 3.91                             | 240          | 80.0  | 20.00 |
| 3.16                             | 372          | 124 | 31.1 | 3.54                             | 295          | 98.3 | 24.6 | 3.92                             | 239          | 79.60 | 19.90 |
| 3.17                             | 370          | 123 | 30.9 | 3.55                             | 293          | 97.7 | 24.5 | 3.93                             | 237          | 79.10 | 19.80 |
| 3.18                             | 368          | 123 | 30.7 | 3.56                             | 292          | 97.2 | 24.3 | 3.94                             | 236          | 78.70 | 19.70 |
| 3.19                             | 366          | 122 | 30.5 | 3.57                             | 290          | 96.6 | 24.2 | 3.95                             | 235          | 78.30 | 19.60 |
| 3.20                             | 363          | 121 | 30.3 | 3.58                             | 288          | 96.1 | 24.0 | 3.96                             | 234          | 77.90 | 19.50 |
| 3.21                             | 361          | 120 | 30.1 | 3.59                             | 286          | 95.5 | 23.9 | 3.97                             | 232          | 77.50 | 19.40 |
| 3.22                             | 359          | 120 | 29.9 | 3.60                             | 285          | 95.0 | 23.7 | 3.98                             | 231          | 77.10 | 19.30 |
| 3.23                             | 356          | 119 | 29.7 | 3.61                             | 283          | 94.4 | 23.6 | 3.99                             | 230          | 76.70 | 19.20 |
| 3.24                             | 354          | 118 | 29.5 | 3.62                             | 282          | 93.9 | 23.5 | 4.00                             | 229          | 76.20 | 19.10 |
| 3.25                             | 352          | 117 | 29.3 | 3.63                             | 280          | 93.3 | 23.3 | 4.01                             | 228          | 75.90 | 19.00 |
| 3.26                             | 350          | 117 | 29.2 | 3.64                             | 278          | 92.8 | 23.2 | 4.02                             | 226          | 75.50 | 18.90 |
| 3.27                             | 347          | 116 | 29.0 | 3.65                             | 277          | 92.3 | 23.1 | 4.03                             | 225          | 75.10 | 18.80 |
| 3.28                             | 345          | 115 | 28.8 | 3.66                             | 275          | 91.8 | 22.9 | 4.04                             | 224          | 74.70 | 18.70 |
| 3.29                             | 343          | 114 | 28.6 | 3.67                             | 274          | 91.2 | 22.8 | 4.05                             | 223          | 74.30 | 18.60 |
| 3.30                             | 341          | 114 | 28.4 | 3.68                             | 272          | 90.7 | 22.7 | 4.06                             | 222          | 73.90 | 18.50 |
| 3.31                             | 339          | 113 | 28.2 | 3.69                             | 271          | 90.2 | 22.6 | 4.07                             | 221          | 73.50 | 18.40 |
| 3.32                             | 337          | 112 | 28.1 | 3.70                             | 269          | 89.7 | 22.4 | 4.08                             | 219          | 73.20 | 18.30 |
| 3.33                             | 335          | 112 | 27.9 | 3.71                             | 268          | 89.2 | 22.3 | 4.09                             | 218          | 72.80 | 18.20 |
| 3.34                             | 333          | 111 | 27.7 | 3.72                             | 266          | 88.7 | 22.2 | 4.10                             | 217          | 72.40 | 18.10 |
| 3.35                             | 331          | 110 | 27.6 | 3.73                             | 265          | 88.2 | 22.1 | 4.11                             | 216          | 72.00 | 18.00 |
| 3.36                             | 329          | 110 | 27.4 | 3.74                             | 263          | 87.7 | 21.9 | 4.12                             | 215          | 71.70 | 17.90 |
| 3.37                             | 326          | 109 | 27.2 | 3.75                             | 262          | 87.2 | 21.8 | 4.13                             | 214          | 71.30 | 17.80 |

续表 1-1

| 压痕直径       | 布氏硬度值        |       |       | 压痕直径       | 布氏硬度值        |       |       | 压痕直径       | 布氏硬度值        |       |       |
|------------|--------------|-------|-------|------------|--------------|-------|-------|------------|--------------|-------|-------|
| $d_{10}$   | $0.102F/D^2$ |       |       | $d_{10}$   | $0.102F/D^2$ |       |       | $d_{10}$   | $0.102F/D^2$ |       |       |
| $2d_5$     | 30           | 10    | 2.5   | $2d_5$     | 30           | 10    | 2.5   | $2d_5$     | 30           | 10    | 2.5   |
| $4d_{2.5}$ |              |       |       | $4d_{2.5}$ |              |       |       | $4d_{2.5}$ |              |       |       |
| 4.14       | 213          | 71.00 | 17.70 | 4.47       | 181          | 60.40 | 15.10 | 4.80       | 156          | 51.90 | 13.00 |
| 4.15       | 212          | 70.60 | 17.60 | 4.48       | 180          | 60.10 | 15.00 | 4.81       | 155          | 51.70 | 12.90 |
| 4.16       | 211          | 70.20 | 17.60 | 4.49       | 179          | 59.80 | 14.90 | 4.82       | 154          | 51.40 | 12.90 |
| 4.17       | 200          | 69.90 | 17.50 | 4.50       | 179          | 59.50 | 14.90 | 4.83       | 154          | 51.20 | 12.80 |
| 4.18       | 209          | 69.50 | 17.40 | 4.51       | 178          | 59.20 | 14.80 | 4.84       | 183          | 51.00 | 12.70 |
| 4.19       | 208          | 69.20 | 17.30 | 4.52       | 177          | 59.00 | 14.70 | 4.85       | 152          | 50.70 | 12.70 |
| 4.20       | 207          | 68.80 | 17.20 | 4.53       | 176          | 58.70 | 14.70 | 4.86       | 152          | 50.50 | 12.60 |
| 4.21       | 205          | 68.50 | 17.10 | 4.54       | 175          | 58.40 | 14.60 | 4.87       | 151          | 50.30 | 12.60 |
| 4.22       | 204          | 68.20 | 17.00 | 4.55       | 174          | 58.10 | 14.50 | 4.88       | 150          | 50.10 | 12.50 |
| 4.23       | 203          | 67.80 | 17.00 | 4.56       | 174          | 57.90 | 14.50 | 4.89       | 150          | 49.80 | 12.50 |
| 4.24       | 202          | 67.50 | 16.90 | 4.57       | 173          | 57.60 | 14.40 | 4.90       | 149          | 49.60 | 12.40 |
| 4.25       | 201          | 67.10 | 16.80 | 4.58       | 172          | 57.30 | 14.30 | 4.91       | 148          | 49.40 | 12.40 |
| 4.26       | 200          | 66.80 | 16.70 | 4.59       | 171          | 57.10 | 14.30 | 4.92       | 148          | 49.20 | 12.30 |
| 4.27       | 199          | 66.50 | 16.60 | 4.60       | 170          | 56.80 | 14.20 | 4.93       | 147          | 49.00 | 12.20 |
| 4.28       | 198          | 66.20 | 16.50 | 4.61       | 170          | 56.50 | 14.10 | 4.94       | 146          | 48.80 | 12.20 |
| 4.29       | 198          | 65.80 | 16.50 | 4.62       | 169          | 56.30 | 14.10 | 4.95       | 146          | 48.60 | 12.10 |
| 4.30       | 197          | 65.50 | 16.40 | 4.63       | 168          | 56.00 | 14.00 | 4.96       | 145          | 48.40 | 12.10 |
| 4.31       | 196          | 65.20 | 16.30 | 4.64       | 167          | 55.80 | 13.90 | 4.97       | 144          | 48.10 | 12.00 |
| 4.32       | 195          | 64.90 | 16.20 | 4.65       | 167          | 55.50 | 13.90 | 4.98       | 144          | 47.90 | 12.00 |
| 4.33       | 194          | 64.60 | 16.10 | 4.66       | 166          | 55.30 | 13.80 | 4.99       | 143          | 47.70 | 11.90 |
| 4.34       | 193          | 64.20 | 16.10 | 4.67       | 165          | 55.00 | 13.80 | 5.00       | 143          | 47.50 | 11.90 |
| 4.35       | 192          | 63.90 | 16.00 | 4.68       | 164          | 54.80 | 13.70 | 5.01       | 142          | 47.30 | 11.80 |
| 4.36       | 191          | 63.60 | 15.90 | 4.69       | 164          | 54.50 | 13.60 | 5.02       | 141          | 47.10 | 11.80 |
| 4.37       | 190          | 63.30 | 15.80 | 4.70       | 163          | 54.30 | 13.60 | 5.03       | 141          | 46.90 | 11.70 |
| 4.38       | 189          | 63.00 | 15.80 | 4.71       | 162          | 54.00 | 13.50 | 5.04       | 140          | 46.70 | 11.70 |
| 4.39       | 188          | 63.70 | 15.70 | 4.72       | 161          | 53.80 | 13.40 | 5.05       | 140          | 46.50 | 11.60 |
| 4.40       | 187          | 62.40 | 15.60 | 4.73       | 161          | 53.50 | 13.40 | 5.06       | 139          | 46.30 | 11.60 |
| 4.41       | 186          | 62.10 | 15.50 | 4.74       | 160          | 53.30 | 13.30 | 5.07       | 138          | 46.10 | 11.50 |
| 4.42       | 185          | 61.80 | 15.50 | 4.75       | 159          | 53.00 | 13.30 | 5.08       | 138          | 45.90 | 11.50 |
| 4.43       | 185          | 61.50 | 15.40 | 4.76       | 158          | 52.80 | 13.20 | 5.09       | 137          | 45.70 | 11.40 |
| 4.44       | 184          | 61.20 | 15.30 | 4.77       | 158          | 52.60 | 13.10 |            |              |       |       |
| 4.45       | 183          | 60.90 | 15.20 | 4.78       | 157          | 52.30 | 13.10 |            |              |       |       |
| 4.46       | 182          | 60.60 | 15.20 | 4.79       | 156          | 52.10 | 13.00 |            |              |       |       |

注：表中压痕直径为  $d_{10}$  (即  $d=10$  mm) 钢球试验数值。若用  $d=5$  mm 的钢球试验，所得压痕直径应乘以 2；若用  $d=2.5$  mm 的钢球试验，所得压痕直径应乘以 4。

布氏硬度的标注，一般采用在符号“HBS”或“HBW”之前注明硬度值，符号后面按以下顺序用数值表示试验条件：① 压头球体直径(mm)；② 试验力(kgf 或 N)；③ 试验力保持时

间(s),10~15 s 不标注。例如:130HBS10/1000/30 表示压头直径为 10 mm 的钢球在 1000 kgf(9807 N)试验力作用下,保持 30 s 测得布氏硬度值为 130。400HBW5/750 表示压头直径为 5 mm 的硬质合金球在 750 kgf(7355 N)试验力作用下,保持 10~15 s 测得的布氏硬度值为 400。

由于布氏硬度测定的压痕面积较大,故可不受金属内部组成相细微不均匀性的影响,测试结果较准确。一般使用布氏硬度测定小于 450 的材料,如有色金属、低碳钢、灰铸铁和退火、正火、调质处理的中碳结构钢及半成品件,而对于硬度高的材料、薄壁工件、表面要求高的工件和成品件,则不宜用布氏硬度计测定。若要测定,只能使用硬质合金球压头进行测定。

布氏硬度试验规范见表 1-2。

表 1-2 布氏硬度试验规范

| 材料种类              | 布氏硬度值<br>范围/HB | 试样厚度<br>/mm | 载荷 F<br>/N(kgf) | 钢球直径 D<br>/mm | $0.102F/D^2$ | 载荷保持<br>时间/s |
|-------------------|----------------|-------------|-----------------|---------------|--------------|--------------|
| 钢和铸铁              | 450~140        | >6          | 29420(3000)     | 10            | 30           | 10~15        |
|                   |                | 6~3         | 7355(750)       | 5             |              |              |
|                   |                | <3          | 1839(187.5)     | 2.5           |              |              |
|                   | <140           | >6          | 9807(1000)      | 10            | 10           | 10~15        |
|                   |                | 6~3         | 2452(250)       | 5             |              |              |
|                   |                | <3          | 613(62.5)       | 2.5           |              |              |
| 有色金属及其<br>合金(铜、铝) | $\geq 130$     | >6          | 29420(3000)     | 10            | 30           | 30           |
|                   |                | 6~3         | 7355(750)       | 5             |              |              |
|                   |                | <3          | 1839(187.5)     | 2.5           |              |              |
|                   | 35~130         | >6          | 9807(1000)      | 10            | 10           | 30           |
|                   |                | 6~3         | 2452(250)       | 5             |              |              |
|                   |                | <3          | 613(62.5)       | 2.5           |              |              |
|                   | <35            | >6          | 4903(500)       | 10            | 5            | 60           |
|                   |                | 6~3         | 1226(125)       | 5             |              |              |
|                   |                | <3          | 307(31.25)      | 2.5           |              |              |

因为硬度和强度以不同形式反应了金属材料在载荷作用下抵抗变形和断裂的能力,所以二者之间存在着一定的关系,其经验换算关系为

- 低碳钢  $1 \sigma_b \approx 3.6 \text{ HBS}$
- 高碳钢  $1 \sigma_b \approx 3.4 \text{ HBS}$
- 调质合金钢  $1 \sigma_b \approx 3.25 \text{ HBS}$
- 灰铸铁  $1 \sigma_b \approx 1 \text{ HBS}$

式中, $\sigma_b$  的单位为 MPa。譬如,当低碳钢构件的硬度为 100 HBS 时,则其抗拉强度  $\sigma_b \approx 3.6 \times 100 = 360 \text{ MPa}$ 。

二、洛氏硬度(HR)

根据 GB/T 230—91《金属洛氏硬度试验方法》,洛氏硬度试验的原理和方法是在洛氏硬

度计上用金刚石圆锥体(或钢球)压头,在先后施加两个载荷(即初始载荷  $F_0$  和主载荷  $F_1$ )的作用下逐步压入试件表面,经保持一定(规定)时间后卸去主载荷  $F_1$ ,保持初始载荷  $F_0$ ,并用测量其残余压入深度  $h$  来计算硬度值。这种方法测定出来的硬度称为洛氏硬度,用 HR 表示。根据压头的种类和总载荷的大小,洛氏硬度常用 HRA、HRB、HRC 三种尺度表示。生产实际中,测量工件的硬度可以直接从洛氏硬度计表盘上读出硬度值,不需要测量和计算。图 1-4 为洛氏硬度测试原理图。洛氏硬度的表示方法采取“HR”前面的数值为硬度数值,例如:55HRC,表示用 C 尺度测得的洛氏硬度值为 55。

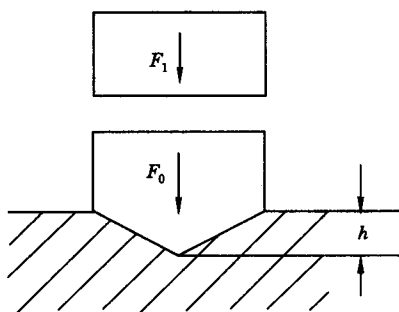


图 1-4 洛氏硬度测试原理示意图

洛氏硬度测定操作简便,可直接从洛氏硬度计表盘上读出硬度值;测量范围大,可测最硬和最软的材料;压痕小,可直接测量成品。因此,广泛用于测定各种材料、不同工件以及薄、小和表面要求高的工件的硬度。

但因为洛氏硬度测定压痕小,对内部组织和性能不均匀的材料,测量结果可能不够准确、稳定、典型,所以要求测量不同部位三个点,取其算术平均值作为被测定材料或构件的硬度值。当布氏硬度在 220 至 500 之间时,布氏硬度与洛氏硬度之间大致满足以下关系

$$\text{HRC} = \frac{1}{10} \text{HBS}$$

即当材料的布氏硬度为 300 HBS 时,相当于洛氏硬度为 30 HRC。洛氏硬度试验规范见表 1-3。

表 1-3

洛氏硬度试验规范

| 硬度单位 | 洛氏硬度值范围 | 压头类型         | 初始载荷 $F_0$<br>/N | 主载荷 $F_1$<br>/N | 总载荷 $F$<br>/N(kgf) | 应用               |
|------|---------|--------------|------------------|-----------------|--------------------|------------------|
| HRA  | 70~85   | 120°金钢石圆锥体   | 98.07            | 490.3           | 588.4 (60)         | 硬质合金、表面渗碳钢、表面淬火钢 |
| HRB  | 25~100  | φ1.588 mm 钢球 | 98.07            | 882.6           | 980.7 (100)        | 有色金属、退火钢、正火钢     |
| HRC  | 20~67   | 120°金钢石圆锥体   | 98.07            | 1372.9          | 1471.0 (150)       | 淬火钢、调质钢          |

注:  $F = F_0 + F_1$ 。

### 三、维氏硬度(HV)

维氏硬度测定的方法和基本原理与布氏硬度相同,也是根据试件表面压痕单位面积承受的压力大小来测量的。不同的是,维氏硬度压头是锥面夹角为 136°的金刚石正四棱锥体。维氏硬度测试原理如图 1-5 所示。根据 GB 4340—84《金属维氏硬度试验方法》的规定,测试时,用选定的试验压力  $F$ ,将压头压入试件表面并保持一定时间,卸载后测量压痕对角线长度  $d$ ,即可确定被测金属材料的硬度值。这种方法测定出来的硬度称为维氏硬度,用 HV 表示,即



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

式中  $F$ ——试验压力,kgf(N);  
 $d$ ——压痕对角线长度,mm。

通过维氏硬度表查得的维氏硬度值以 kgf/mm<sup>2</sup> 作为单位,并且习惯上不予标出。比如,当试验力  $F$  为 30 kgf(294.2 N),压痕对角线平均长度  $d$  为 0.3 mm 时,查得的维氏硬度值为 618。

由于维氏硬度测试的压痕为轮廓分明的正方形或近似正方形,便于测量,误差较小,精度较高,测量范围广,所以适用于测定各种软、硬金属,尤其适用于渗碳、渗氮工件和极薄零件的硬度。但其操作不如洛氏硬度测定方法简便,效率不高,测点的代表性不强,所以不宜用于大批量生产工件的常规测定。

维氏硬度的标注,一般采用在符号“HV”之前注明硬度值,符号后面按以下顺序用数值表示试验条件:① 试验力(kgf 或 N);② 试验力保持时间(s),10~15 s 不标注。例如:640HV30,表示在 30 kgf(294.2 N)试验力作用下,保持 10~15 s 测得的维氏硬度值为 640。640HV30/20 表示在 30 kgf(294.2 N)试验力作用下,保持 20 s 测得的维氏硬度值为 640。

维氏硬度试验力规范见表 1-4。

表 1-4 维氏硬度试验力规范

| 硬度符号       | HV5      | HV10      | HV20      | HV30      | HV50      | HV100      |
|------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 试验力/kgf(N) | 5(49.03) | 10(98.07) | 20(196.1) | 30(294.2) | 50(490.3) | 100(980.7) |

总的来说,硬度实际上反映了金属材料的综合力学性能,它不仅从金属表面层的一个局部反映了材料的强度(即抵抗局部变形,特别是塑性变形的能力),也反映了材料的塑性(压痕的大小或深浅)。硬度试验和拉伸试验都是利用静载荷确定金属材料力学性能的方法,但拉伸试验属于破坏性试验,测定方法也比较复杂;硬度试验则简便迅速,基本上不损伤材料,甚至不需要做专门的试样,可以直接在工件上测试。因此,硬度试验在生产中得到更为广泛的应用,常常把各种硬度值作为技术要求标注在零件工作图上。

### 第三节 冲击韧性与金属疲劳

塑性、强度、硬度等都是在静载荷作用下测量金属材料的力学性能。而实际上,多数机械零件和构件却不是静载荷作用下工作,它们往往要承受动载荷的作用。由于动载荷作用下产生的变形和破坏要比静载荷作用时大得多,因此,必须考虑动载荷对机械零件和构件的作用。冲击韧性和疲劳是在动载荷作用下测定的金属材料的力学性能。

#### 一、冲击韧性

金属材料抵抗冲击载荷作用而不被破坏的能力称为冲击韧性,即金属材料在冲击力作

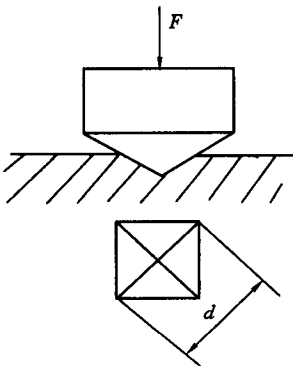


图 1-5 维氏硬度测试原理示意图