

全国高职高专机电专业系列规划教材

工程材料与热处理

GONGCHENG CAILIAO YU RECHULI

蒋清亮 范允昕 主编

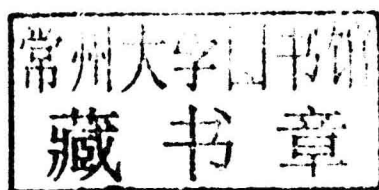


中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

全国高职高专机电专业系列规划教材

工程材料与热处理

蒋清亮 范允昕 主 编



中国科学技术出版社

CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 北 京 ·

BEIJING

图书在版编目(CIP)数据

工程材料与热处理/蒋清亮,范允昕主编. —北京:中国科学技术出版社,2010.8

(全国高职高专机电专业系列规划教材)

ISBN 978-7-5046-5685-8

I. ①工… II. ①蒋… ②范… III. ①工程材料-高等学校:技术学校-教材
②热处理-高等学校:技术学校-教材 IV. ①TB3 ②TG15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 148965 号

本社图书贴有防伪标志,未贴为盗版。

内 容 摘 要

本书为职业技术类院校机械制造类专业的技术基础课教材。全书共分十章,主要内容包括金属的力学性能,金属学基础知识,钢的热处理,金属材料,高分子、陶瓷材料及复合材料五部分。每章后附有可供选作的习题与思考题。书后备有四个附录,可供读者查阅。

本书为一般高职高专的机械制造、模具制造技术等机械类专业教材,也可供高等职业技术学院材料成型与控制、焊接等热加工专业使用,还可供中等职业学校及各类工程技术人员参考。

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

策划编辑 林 培 孙卫华 责任校对 林 华

责任编辑 孙卫华 责任印制 安利平

发行部电话:010-62173865 编辑部电话:010-84123361-6029

<http://www.kjbbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京蓝空印刷厂印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:16.375 字数:399 千字

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷 定价:30.60 元

ISBN 978-7-5046-5685-8/TB·79

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

前 言

《工程材料与热处理》是职业技术类院校制造类专业的技术基础课教材。主要对象为一般高职高专的机械制造、模具制造技术等专业的学生,也可供高等职业技术学院材料成型与控制、焊接、热加工专业选用。

本教材内容包括金属的力学性能,金属学,热处理原理和工艺,金属材料,高分子、陶瓷材料及复合材料五部分。第一章为金属的力学性能,主要介绍金属常用力学性能的测定方法以及常用的力学性能指标。金属学部分包括第二章金属的晶体结构和结晶,第三章介绍合金的结构、二元合金相图与合金的结晶。第四章为铁碳合金相图及铁碳合金的分类、成分、组织及性能。第五章为金属的塑性变形及再结晶。第六章是钢的热处理原理和热处理工艺部分,重点阐述了钢在不同工艺条件下组织转变规律以及生产中常用的热处理工艺方法并对常用机械零件热处理工艺的选择、热处理在机械零件制造过程中的工序位置安排,对热处理零件的结构工艺性等也作了必要介绍。金属材料部分包括第七章工业用钢、第八章铸铁、第九章有色金属及其合金。本教材特点是在材料介绍中注意金属学和热处理原理等方面的基本知识的运用,并能比较紧密地联系生产实际,对材料的成分特点、组织性能特点、使用特点进行归纳总结,目的是使学生能够在有限的课时内,比较容易地熟悉和掌握各类不同材料的特性和常见机械零件的用材情况。能够对金属材料选用和使用中的一般问题进行必要的分析。第十章高分子、陶瓷材料及复合材料,对高分子、陶瓷材料及复合材料做了一定篇幅的介绍。

本教材在内容的安排上,主要考虑到职业技术类教育的特点以及学生的知识结构,同时注意到我国近年制造业的发展及产业结构调整的特点,并结合近年来职业技术类教育工学结合教学改革的方向,力图贯彻简明、易懂、实用及方便自学的原则,对一些难以理解的基本概念和基本理论注意讲清问题的来龙去脉,指明思路并进行归纳总结,叙述上力求由浅入深,深广适中,便于教学。为了使学生会学会对所学知识进行归纳总结,训练学生分析问题和解决问题的能力,各章均安排了一定量的习题和思考题。书末备有四个附录并提供了进一步学习的参考文献。

本书由西安理工大学高等技术学院蒋清亮、范允昕任主编。其中,第一、二、三、四、五、六、八、九、十章及附录由蒋清亮及范允昕共同编写,第七章由蒋清亮和陕西航空职业技术学院赵华共同编写,谢春生统审全书。在编写过程中得到了西安理工大学高等技术学院机电系、机械制造教研室、模具教研室及工程材料实验室等部门的大力协助,在此一并表示感谢。

因编者的水平有限,教材的不足和疏漏在所难免,恳请读者批评和指正。

编 者
2010年2月

目 录

第一章 金属的力学性能	1
第一节 强度与塑性	1
第二节 硬 度	6
第三节 冲击韧性	11
第四节 金属的疲劳	13
习题与思考题	15
第二章 金属的结构与结晶	17
第一节 金属的特性	17
第二节 金属的晶体结构	18
第三节 金属的实际晶体结构	22
第四节 纯金属的结晶	26
习题与思考题	32
第三章 合金的结构与相图	33
第一节 固态合金的相结构	33
第二节 二元合金相图的建立	38
第三节 二元匀晶相图	39
第四节 二元共晶相图	41
第五节 其他类型的二元合金相图	46
第六节 合金性能与相图的关系	47
习题与思考题	48
第四章 铁碳合金相图	49
第一节 纯铁、铁碳合金的基本相	49
第二节 铁碳合金相图分析	50
第三节 典型铁碳合金的结晶过程及其组织	54

第四节 铁碳合金的成分、组织与性能之间的关系	58
第四节 铁碳相图的应用	59
习题与思考题	61
第五章 金属的塑性变形与再结晶	62
第一节 金属的塑性变形	62
第二节 冷塑性变形对金属组织结构和性能的影响	67
第三节 金属的回复与再结晶	71
第四节 金属的热变形加工	75
习题及思考题	78
第六章 钢的热处理	79
第一节 钢在加热时的组织转变	80
第二节 钢在冷却时的组织转变	83
第三节 钢的退火与正火	95
第四节 钢的淬火	100
第五节 钢的回火	109
第六节 钢的表面淬火	113
第七节 钢的化学热处理	116
第八节 表面气相沉积	122
第九节 机械设计及加工中常见的热处理问题	125
习题及思考题	129
第七章 工业用钢	131
第一节 钢的分类与牌号	131
第二节 钢中常存杂质元素对其性能的影响	135
第三节 合金元素在钢中的作用	137
第四节 工程结构用钢	142
第五节 机械制造结构钢	147
第六节 工具钢	162
第七节 不锈钢和耐热钢	175
习题及思考题	182
第八章 铸 铁	184
第一节 铸铁的石墨化	185
第二节 灰铸铁	188
第三节 球墨铸铁	191

第四节 可锻铸铁	194
第五节 蠕墨铸铁	196
习题与思考题	197
第九章 有色金属及粉末冶金材料	199
第一节 铝及铝合金	199
第二节 铜及铜合金	206
第三节 镁及其合金	213
第四节 滑动轴承合金	215
第五节 粉末冶金及硬质合金	219
习题与思考题	225
第十章 高分子、陶瓷及复合材料	226
第一节 高分子材料	226
第二节 陶瓷材料	234
第三节 复合材料	237
习题与思考题	241
附录 A 常用布氏硬度换算表	242
附录 B 钢的硬度及抗拉强度换算表	245
附录 C 常用钢种的临界温度	249
附录 D 热处理工艺分类及代号 (GB/T12693 - 90)	252
参考文献	254

第一章 金属的力学性能

大多数机器零件或构件都是金属材料制造的，在不同的载荷（如拉伸、压缩、弯曲、扭转、冲击、交变应力等）与环境条件下（温度、介质）工作。如果金属材料的力学性能与工作条件不相适应，就会使机件失去预定的效能而损坏，即产生所谓的“失效”现象。零件或构件常见的失效形式有断裂、磨损、过量弹性变形和过量塑性变形等。因此，金属的力学性能可理解为金属受力时，对变形与断裂的抵抗能力。

在工程和机械设计中，要根据零件的工作条件提出其性能要求，然后再根据零件的性能要求选择合适的材料，以确保零件安全工作并使之具有足够长的寿命。显然，掌握材料力学性能的基本知识，熟知各种力学性能指标，不仅是零件设计、材料选用时的重要依据；而且也是按照技术标准验收和鉴定原材料以及在生产过程中对产品的工艺进行质量控制的重要参数。

因不同零件工作时所承受的外加载荷不同、环境的温度与介质等外在因素亦可能不同，而金属材料在不同载荷条件下所表现出的力学行为也不相同，所以材料在各种载荷下的力学性能指标可通过设计一系列不同的试验来测定。常用的力学性能有：强度、塑性、刚度、弹性、硬度、冲击韧性和疲劳等。

第一节 强度与塑性

静拉伸试验是工业上最广泛使用的力学性能试验方法之一。试验时在试样两端缓慢地施加载荷，使试样在工作部分受轴向拉力沿轴向伸长，一般进行到拉断为止。然后测定试样对外加载荷的抗力，可以求出材料的强度指标；测定试样在断裂后塑性变形的大小，可以求出材料的塑性指标。

一、拉伸试验与拉伸试样

拉伸试验一般采用标准圆形试样在拉伸试验机上测定各种强度和塑性指标。为了确保金属处于单向拉伸状态，对试样的形状、尺寸和加工，均有一定要求。在国家标准 GB228—87 中对拉伸试样的形状、尺寸和加工均有明确规定。图 1-1 所示为常用标准拉伸试样，试样共分工作部分、过渡部分和夹持部分。试样的直径为 d_0 ，标距长度为 L_0 。标距范围为工作部分，要求表面光滑，以保证材料表面也是单向拉伸；过渡部分必须有适当的台肩和圆角，以降低应力集中，保证该处不会变形和断裂。

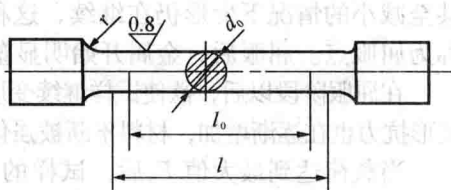


图 1-1 图形拉伸试样示意图

二、拉伸曲线与应力应变曲线

试验时,将试样装夹在拉伸试验机上,缓慢增加拉力,试样的标距长度将逐渐增加,直至拉断。根据试样在拉伸过程中承受的拉力 F ,与其所对应的试样标距长度 L_0 部分的伸长量 ΔL 之间的关系,绘出载荷—伸长曲线,这种曲线叫做拉伸曲线或拉伸图。

(一) 拉伸曲线与金属的变形过程

图1-2所示为退火低碳钢的拉伸曲线,低碳钢试样拉伸过程可分为弹性变形、塑性变形和断裂三个阶段。

当载荷较小 $F < F_p$ 时,试样的伸长与载荷呈正比增加,保持直线关系。载荷超过 F_p 后,拉伸曲线开始偏离直线。在 $F_p \sim F_e$ 之间,伸长量和载荷已不再成正比关系,但试样基本仍处于弹性变形阶段。

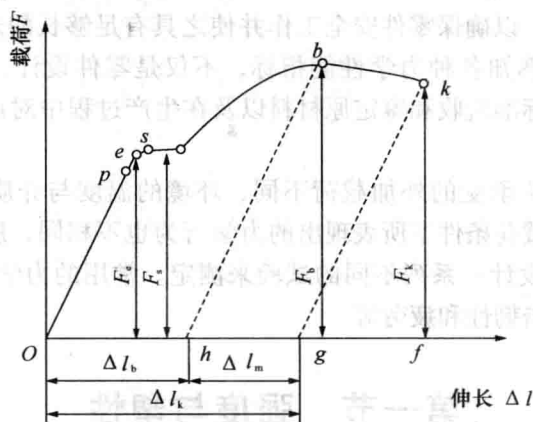


图1-2 低碳钢拉伸曲线

变形开始阶段,试样受力产生伸长变形,卸载后立刻恢复原状,这种变形称为弹性变形。当载荷大于 F_e 后卸载时,试样的伸长只能部分地恢复,而保留一部分残留变形。这种卸载后保留下来的残留变形称为塑性变形。 F_e 是开始产生微量塑性变形时的载荷。一般来说, F_p 与 F_e 是非常接近的。

当载荷增大至 $F > F_e$ 后,拉伸曲线上出现水平或锯齿状的延伸平台,表明载荷不增加甚至减小的情况下变形仍在继续,这种现象称为“屈服”。 F_s 是屈服阶段的最小载荷,常称为屈服点。屈服后,金属开始明显塑性变形。

在屈服阶段以后,欲使试样继续变形,必须不断地增加载荷。这种随着塑性变形不断增加,变形抗力也在逐渐增加,材料不断被强化的现象称之为“形变强化”或“加工硬化”。

当载荷达到最大值 F_b 后,试样的某一部位截面突然产生大量塑性变形而开始急剧缩小,出现所谓的“缩颈”现象,此后的变形主要集中在缩颈附近。由于缩颈处试样截面急剧缩小,致使载荷下降。

载荷达 k 点时,试样断裂,载荷 F_k 称为断裂载荷。

工业上使用的金属材料,多数是没有屈服现象的,其拉伸曲线如图1-3所示。

图1-3a是塑性材料的拉伸图,如退火状态的铝合金,经调质处理的合金钢等。图1-3b是低塑性材料的拉伸图,它不仅没有屈服现象,而且也不产生缩颈,拉伸时的最大载荷就是其断裂载荷。

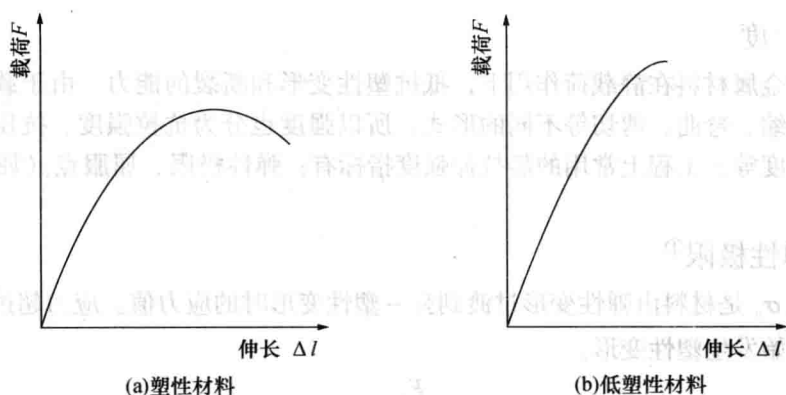


图 1-3 塑性材料及低塑性材料的拉伸图

应当指出，低碳钢这类塑性材料在断裂前会出现屈服且有明显的塑性变形，这种断裂称为塑性断裂。某些脆性材料（如铸铁等），往往在尚未产生明显的塑性变形时就发生断裂，不仅没有屈服现象，也不会出现颈缩，这种断裂称为脆性断裂。

综上所述，金属在外力作用下，变形过程一般分为三个阶段：即弹性变形、弹塑性变形和断裂。

（二）应力 - 应变曲线（ $\sigma - \varepsilon$ 曲线）

由于拉伸曲线上的载荷 F 与伸长量 ΔL 不仅与试验材料性能有关，还与试样的尺寸有关。为了消除试样尺寸因素的影响，工程中常采用应力—应变曲线。

应力：在轴向拉伸的条件下用试样承受的拉力 F 除以试样的原始横截面积 S_0 表示。

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \text{ (MPa)}$$

应变：是指试样的伸长量 ΔL 与原始标距长度 L_0 的比值。用 ε 表示。

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{l_0}$$

这种以 σ 与 ε 为坐标绘出的应力与应变的关系曲线，称之为应力—应变曲线，图 1-4 是低碳钢的应力—应变曲线示意图。应力—应变曲线的形状与拉伸曲线相似，只是坐标与数值不同。但它排除了试样尺寸因素对试验数据的影响，故可以直接从图中确定材料的某些力学性能数据。

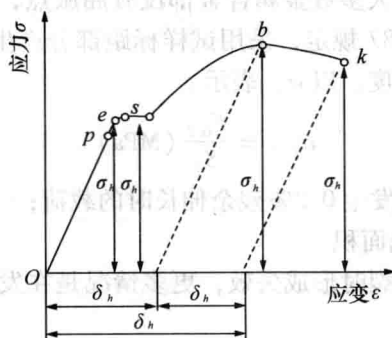


图 1-4 低碳钢应力—应变曲线

三、强度

强度是指金属材料在静载荷作用下,抵抗塑性变形和断裂的能力。由于载荷的作用方式有拉伸、压缩、弯曲、剪切等不同的形式,所以强度也分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度和抗剪强度等。工程上常用的静拉伸强度指标有:弹性极限、屈服点(屈服强度)和抗拉强度等。

(一) 弹性极限^①

弹性极限 σ_e 是材料由弹性变形过渡到弹-塑性变形时的应力值。应力超过弹性极限以后,金属便开始发生塑性变形。

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ (MPa)}$$

式中, F_e ——试样不发生塑性变形的最大载荷;

S_0 ——试样的原始横截面积。

工作中不允许产生微量塑性变形的零件(精密的弹性元件、炮筒等),设计时应以弹性极限数据来选材。例如,弹簧是典型的弹性零件,主要起缓冲和贮存能量的作用,如果选用的弹簧材料的弹性极限低,弹簧工作时就可能产生塑性变形,尽管每次变形可能很小,但时间长了,弹簧的尺寸将发生明显的变化,导致弹簧失效,因此设法提高弹簧材料的弹性极限是非常必要的。

(二) 屈服极限

1. 屈服点 σ_s

屈服点 σ_s 是指应力-应变曲线上试样发生屈服时所对应的应力值,表示材料开始产生明显塑性变形时的最小应力值,即

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0} \text{ (MPa)}$$

式中, F_s ——试样发生屈服现象时的载荷;

S_0 ——试样的原始横截面积。

2. 屈服强度 $\sigma_{0.2}$

屈服点是具有屈服现象的材料特有的强度指标。事实上除退火或热轧的低碳钢和中碳钢等少数合金有屈服现象外,大多数金属合金都没有屈服点,如高碳淬火钢、铸铁等材料等。因此,国家标准 GB228-87 规定,采用试样标距部分产生 0.2% 残余伸长时对应的应力值,作为这些材料的屈服强度,以 $\sigma_{0.2}$ 表示。

$$\sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{S_0} \text{ (MPa)}$$

式中, $F_{0.2}$ ——试样标距部分发生 0.2% 残余伸长时的载荷;

S_0 ——试样的原始横截面积

零件或结构件不仅是在破裂时形成失效,更多情况是在发生少量塑性变形后,往往由

① GB228-87 中已取消弹性极限和屈服强度的工程定义,两者统称为规定微量塑性变形伸长应力(规定伸长应力)。考虑到这两种性能指标的物理意义还是存在,以及它们在工程上仍在应用,本书仍保留。

于零件精度降低或与其他零件的相互配合受到影响而失效。所以,屈服点 σ_s 和屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 通常是一般机械零件设计和选材的主要依据。正因为如此,屈服强度被公认是评定金属材料的重要力学性能指标,资料中大多数金属材料都有屈服强度的数据。

(三) 强度极限 σ_b

强度极限 σ_b 是指材料在断裂前所能承受的最大应力值,即

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0} \text{ (MPa)}$$

式中, F_b ——试样断裂前所能承受的最大载荷;

S_0 ——试样的原始横截面积。

试样在拉伸过程中,达到最大载荷之前已发生大量的均匀塑性变形,因此,塑性材料的 σ_b 对于设计计算一般没有直接意义。但尽管如此,强度极限 σ_b 在技术上还是很重要的。它的物理意义是表征材料对大量均匀变形的抗力,表征材料在拉伸条件下所能承受的最大载荷的应力值,工程上通常称为抗拉强度。铸铁等脆性材料拉伸过程中一般不出现缩颈现象,抗拉强度就是材料的断裂强度,表示材料抵抗断裂的能力。

四、塑 性

金属材料在断裂前发生塑性变形的能力叫做塑性。塑性指标常用断后伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 来表示。

(一) 断后伸长率 δ

断后伸长率是指试样拉断后标距部分的伸长量 $l_1 - l_0$ 与原始标距长度 l_0 的比值,即

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

式中, l_1 ——试样拉断后标距部分的长度;

l_0 ——试样的原始标距长度。

(二) 断面收缩率 ψ

断面收缩率 ψ 是指试样拉断处横截面积的减小量 $S_0 - S_1$ 与原始横截面积 S_0 的比值,即

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

式中, S_1 ——试样拉断后断裂处的最小横截面积;

S_0 ——试样的原始横截面积。

断后伸长率表示试样拉伸后的相对伸长量,断面收缩率表示试样断裂后截面的相对收缩值,两者都是材料的塑性指标。 δ 值和 ψ 值越大,材料的塑性越好。一般根据断面收缩率 ψ 值来评定金属的塑性比用断后伸长率 δ 要合理得多,因为前者反映得是自均匀塑性变形到集中塑性变形的总塑性。当真实塑性在 30% 以下时,断面收缩率 ψ 比较接近真实塑性。但对于受拉伸的长杆件类零件用材,则可以用 δ 来进行塑性评定。

塑性指标通常不直接用于设计计算,但任何零件都要求材料具有一定的塑性。这是因为良好的塑性能使零件在较大的范围内产生塑性变形,使局部高应力重新分布,缓和应力

集中、消减应力峰值,并产生形变强化,从而可以保证零件工作安全。如零件在使用过程中偶然过载时,塑性好的材料能产生一定的塑性变形而不至于突然脆断。此外,各种压力加工(锻造、轧制、冷冲压等)都要求金属材料必须具有一定的塑性。

第二节 硬 度

硬度是衡量金属材料软硬程度的一种力学性能指标。硬度的试验方法很多,基本可分为表面压入法和表面刻画法两大类。在压入法中,根据加载速度不同又分为静载压入法和动载压入法(弹性回跳法)。在静载压入法中根据载荷、压头和硬度值表示方法的不同,又分为布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度和显微硬度等多种。

硬度值的物理意义随着试验方法的不同,其含义也不同。例如,压入法的硬度值是材料表面在另一物体压入时抵抗塑性变形的能力;刻画法硬度值是表示金属抵抗表面局部断裂的能力;而回跳法硬度值则是表示金属弹性变形功的大小。因此,硬度值实际上不是一个单纯的物理量,它是表征着材料的弹性、塑性、形变强化、强度和韧性等一系列不同物理量组合的一种综合性能指标。一般认为硬度是金属表面抵抗局部压入变形或刻画断裂的能力。

生产中最常用硬度试验的是表面压入法,它是用一定几何形状的压头,在一定的载荷作用下,压入被测金属的表面,根据压入后金属表面产生变形大小来确定材料的硬度值。这类试验方法设备简单,操作快捷方便,可直接在零件或工具上进行试验而不损坏工件,适于成批检验;再者硬度值在一定条件下和抗拉强度、耐磨性等性能指标有一定的联系,可以由硬度值大致推测出其他强度值及材料的耐磨性水平;此外,硬度与金属材料的冷成型加工性、切削加工性、可焊性等工艺性能间也存在着密切的联系,在生产中常作为选择零件加工工艺时的参考。所以,硬度试验是实际生产中产品质量检查、制定合理加工工艺的最常用的试验方法。在产品图样的技术条件中,大多是用硬度作为产品力学性能控制的技术指标的。

一、布氏硬度

布氏硬度的测定原理是用一定大小的载荷 F ,把直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球压入到被测金属的表面如(图 1-5),保持一定的时间后将载荷卸掉,然后测量金属表面形成的压痕直径 d ,由此计算出压痕的表面积 S ,再计算出压痕单位面积上承受的平均压力,以此作为被测金属的硬度值。其符号用 HB 表示。

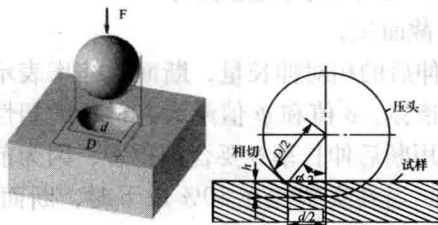


图 1-5 布氏硬度试验原理示意图

当压头材料为淬火钢球时，硬度符号用 HBS 表示；当压头材料为硬质合金时，硬度符号用 HBW 表示。

布氏硬度值的计算公式：

$$\text{斤力 (kgf}^{\text{①}}\text{) 时, HB} = \frac{F}{S} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$$\text{当力的单位为牛顿时 (N) 时, HB} = \frac{F}{S} = 0.102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中， F 表示载荷， D 表示压头的直径 (mm)， d 为压痕直径 (mm)， S 为压痕的表面积 (mm^2)，布氏硬度值的单位为 kgf/mm^2 或 N/mm^2 ，但习惯上只写出硬度值而不标出单位。布氏硬度的表示方法为：硬度值 + 硬度符号 + 试验条件。例如 210HBS 10/1000/30 表示用直径为 10mm 的淬火钢球作压头，在 1000 kgf 作用下，载荷保持时间 30s，测得的布氏硬度值为 210。500HBW 5/750 表示用 5mm 直径的硬质合金球压头，在 750 kgf 作用下，保持 10~15s，测得的布氏硬度值为 500。

表 1-1 布氏硬度试验规范

材料 种类	布氏硬度值 范围	钢球直径 D/mm	$0.102F/D^2$	试验力 F / N (kgf)	保持时间 t/s	备 注
钢、铸铁	≥ 140	10	30	29420 (300)	10	(1) 压痕中心 距试样边沿距离不 应小于压痕平均直 径的 2.5 倍 (2) 相邻压痕 中心距离不应小于 压痕平均直径的 4 倍 (3) 试样厚度 至少应为压痕深度 的 10 倍。试验后， 试样支撑面应无明 显变形痕迹
		5		7355 (75)		
		2.5		1839 (187.5)		
	< 140	10	10	9807 (100)	10 ~ 5	
		5		2452 (250)		
		2.5		613 (62.5)		
非铁金属 材料	≥ 130	10	30	29420 (3000)	30	
		5		7355 (750)		
		2.5		1839 (187.5)		
	55 ~ 30	10	10	9807 (1000)	30	
		5		2452 (250)		
		2.5		613 (62.5)		
	< 35	10	2.5	2452 (250)	60	
		5		613 (62.5)		
		2.5		153 (15.5)		

在进行布氏硬度试验时，由于被测金属材料的种类及工件或试样的厚度不同，若采用一种标准的试验力 F 和压头直径 D ，就会出现对某些材料和工件不适应的现象。但问题是对同一种材料采用不同的 F 和 D 进行试验时，能否保证得到相同的布氏硬度值，关键在于压痕几何形状的相似性，即应建立 F 和 D 的某种选配关系，以保证布氏硬度的不变性。为此，国家标准 GB231-84 规定，球体直径有 10、5、2.5、2 和 1mm 五种；载荷与球体直径平方的比值 $0.102F/D^2$ 有 30、10、2.5 三种。试验时，应根据金属材料的种类、试样厚度及试样的硬度范围，按照表 1-1 的规范选定 $0.102F/D^2$ 值及相应压头直径 D 、试验力 F 和载荷保持时间。

① kgf 为非法定计量单位，此处仍保留，1kgf=9.8N。

布氏硬度实际测试时，硬度值是不用计算的，一般是利用刻度放大镜测出压痕直径 d ，然后根据 d 值及相应的试验条件查附录 A 布氏硬度对照表即可得相应硬度值。

布氏硬度试验的优点是其硬度值代表性全面，因其压痕面积较大，能反映出较大范围内被测金属的平均硬度，而不受金属内部微小不均匀性的影响，故试验结果较精确，数据稳定、重复性好；此外，布氏硬度和抗拉强度间存在一定的换算关系。

布氏硬度试验的缺点是其压头采用淬火钢球，由于钢球本身存在变形问题，使其不能测量太硬的材料；同时因压痕较大，不适合测量成品及薄片工件。当压头为淬火钢球，适用于布氏硬度值低于 450 的金属材料；当压头为硬质合金球时；适宜于测定布氏硬度值在 650 以下的金属材料。生产中，布氏硬度主要用于铸铁、非铁金属（如滑动轴承合金）、低合金结构钢等原材料以及结构钢经退火、正火和调质处理件的硬度。

二、洛氏硬度

洛氏硬度试验是目前应用最广泛的硬度试验方法，和布氏硬度一样，它也是一种压入硬度试验。但它不是测定压痕面积，而是测量压痕的深度，以深度的大小表示材料的硬度值；另外，洛氏硬度所用的压头为锥顶角为 120° 金刚石圆锥体或者直径为 1.588mm 的淬火钢球；其次，洛氏硬度试验时载荷分两次施加，先加初载荷，然后再加主载荷，其总载荷为 F ($F = F_1 + F_2$)。

洛氏硬度试验原理可用图 1-6 说明。图中所示为金刚石圆锥压头，0-0 为压头没有和试样接触的初始位置；1-1 是压头在受到 90.07N 的初载荷 F_1 作用后，压入试样深度为 h_1 的位置，加初载荷的目的是使压头与试样表面紧密接触，避免由于试样表面不平整而影响测量结果的精确性；2-2 是加主载荷后，压头在总载荷 F ($F_1 + F_2$) 作用下，压头压入试样深度为 h_2 的位置；然后卸去主载荷 F_2 ，由于试样弹性变形的恢复，压头略微抬高后最终到达 3-3 位置。洛氏硬度要求测量在主载荷作用下产生的压痕深度增量 $h = h_3 - h_1$ ，并以此作为确定材料硬度的依据。

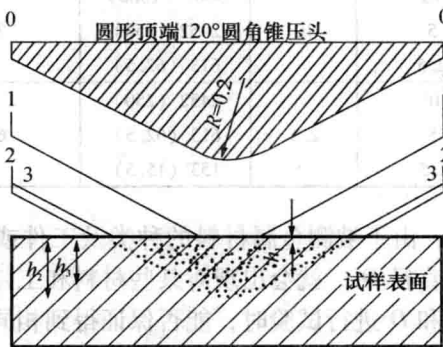


图 1-6 洛氏硬度试验原理图

但根据测量值，金属越硬，压痕深度越小；金属越软，压痕深度越大。若直接以深度 h 作为硬度值，则出现硬的材料 h 值小；软的材料 h 值反而大的现象。为了适应人们习惯上数值越大硬度越高的概念，人为规定用一常数 k 减去 h 后的值，作为洛氏硬度值的指标，并规定 0.002mm 为一个洛氏硬度单位，按下式计算洛氏硬度值。洛氏硬度用符号 HR 表

示, $HR = \frac{k-h}{0.002}$ 使用金刚石圆锥体压头时常数 $k = 0.2\text{mm}$; 用淬火钢球作为压头时, $k = 0.26\text{mm}$; 洛氏硬度没有单位, 是一个无量纲的力学性能指标。

为了能在同一硬度计上测定从极软到极硬各种不同材料的硬度, 洛氏硬度试验采用了不同压头和总载荷, 组合成几种不同的洛氏硬度标尺, 我国最常用的是 A、B、C 三种标尺, 分别用 HRA、HRB、HRC 表示。表 1-2 给出了三种标尺的试验规范及应用范围。

表 1-2 常用三种洛氏硬度的试验条件及应用范围

标尺	硬度符号	压头类型	总载荷 (N 或 kgf)	测量范围	应用范围
A	HRA	金刚石圆锥体	588.4 (60)	20 ~ 88	硬质合金、表面硬化层、淬火工具钢等
B	HRB	$\phi 1.588\text{mm}$ 钢球	980.7 (100)	20 ~ 100	低碳钢、铜合金、铝合金、铁素体可锻铸铁
C	HRC	金刚石圆锥体	1471 (150)	20 ~ 70	淬火钢、调质钢、高硬度铸铁

洛氏硬度的表示方法为: 硬度值 + 硬度符号 + 标尺符号。例如, 60HRC 表示用 C 标尺测得的洛氏硬度值为 60。实际测量时, 洛氏硬度值可从硬度计上的刻度表直接读出。

常规洛氏硬度试验所用的载荷较大, 不适合测定极薄工件及经化学热处理后表面硬化层的硬度。为此, 设计出了一种载荷较小的表面硬度计。其初载荷为 29.4N (3kgf), 总载荷分别为 147.2N (15kgf)、249.3N (30kgf)、441.5N (45kgf)。常数 $k = 0.1\text{mm}$, 并以 0.001mm 作为一个洛氏硬度单位, 刻度盘满刻度为 100。如果用金刚石圆锥压头, 常用来测量渗氮钢、渗碳钢、刀刃、零件边缘部分等, 硬度符号表示为 HR15N、HR30N、HR45N; 如果用淬火钢球压头, 常测量低碳钢、铜合金、铝合金等薄板, 硬度符号表示为 HR15T、HR30T、HR45T。

洛氏硬度试验应在试样的平面上进行, 若在曲率半径较小的柱面或球面上测试时, 由于压痕周围阻力较小, 硬度值偏低, 因此, 试验结果需要加以修正。曲率半径越小, 修正值越大。修正值可查 GB/T230-91。

洛氏硬度试验的优点是测量迅速简便、压痕较小、不损伤工件表面; 同时采用不同的标尺, 可测定各种金属材料的硬度, 也可测定较薄工件或表面薄层的硬度。其缺点是压痕较小, 代表性差, 由于材料中存在偏析及组织不均匀等情况, 使所测硬度值的重复性差, 测定结果不够准确; 并且各硬度标尺之间没有联系, 不同标尺所测硬度值不能直接比较大。洛氏硬度 C 标尺应用最广泛。

三、维氏硬度及显微硬度

为了避免钢球发生永久变形, 布氏硬度只可用来测定硬度小的材料。洛氏硬度由于采用了几种不同的标尺, 测定适用性较布氏硬度强。但几种标尺所测的硬度值无法进换算比较, 使用上仍显不便。为了能在同一种标尺上, 测定从极软到极硬材料的硬度, 因此制定了维氏硬度试验法。

维氏硬度的试验原理基本上与布氏硬度相同，也是根据压痕单位面积上的载荷来计量硬度值。如图 1-7 所示，维氏硬度试验采用一个相对面夹角为 136° 的金刚石正四棱锥体压头，在规定载荷的作用下压入被测金属的表面，保持一定时间后卸除载荷，然后测量压痕投影两对角线的平均长度 d ，进而计算出压痕的表面积，最后求出压痕单位面积上所承受的载荷 (F/S)，以此作为被测试金属的硬度值。维氏硬度的符号为 HV。

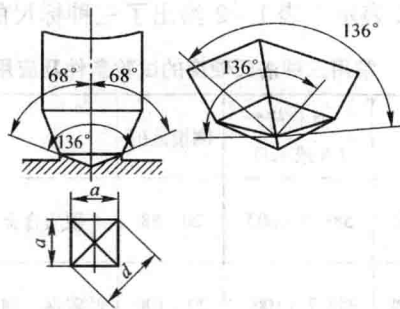


图 1-7 维氏硬度的试验原量示意图

$$\text{当载荷的单位是公斤力 (kgf) 时, } HV = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{d^2}{2\sin 68^\circ}} = 1.8544 \frac{F}{d^2}$$

$$\text{当载荷的单位是牛顿 (N) 时, } HV = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{d^2}{2\sin 68^\circ}} = 0.1891 \frac{F}{d^2}$$

式中， F 为试验载荷； S 为压痕面积；其值是通过测定压痕表面的对角线平均长度 d 来计算的。计算出的维氏硬度值的单位为 kgf/mm^2 或 N/mm^2 ，但通常不标注。实际测定时，测出压痕对角线长度，通过查表得出硬度值。

维氏硬度的表式方法为：硬度值 + 硬度符号 + 测试条件。例如，620HV30/20 表示在 30kgf (249.3N) 载荷作用下，保持 20s 测得的维氏硬度值为 620。如果保荷时间 10 ~ 15s 可以不标注，如 620HV30。维氏硬度常用的载荷有 49.1 (5)、98.1 (10)、196.2 (20)、294.3 (30)、490.5 (50)、981 (100) N (kgf) 等。测量时，如果试件的厚度允许，尽量采用较大的载荷，以便获得较大的压痕，提高测量精度。

维氏硬度的优点是：试验载荷小，压痕较浅，适合测定零件表面淬硬层及化学热处理的表面层（如渗碳层、渗氮层）；同时由于维氏硬度使用一种连续一致的标尺，试验时载荷可任意选择，而不影响硬度值的大小，因此可以测量从极软到极硬的各种金属材料的硬度，既可测尺寸厚大的工件又能测很薄的工件。缺点是试样表面要求高，硬度值的测定较麻烦，工作效率不如洛氏硬度高。

显微硬度实质上就是小载荷维氏硬度试验，显微硬度试验可用于测定金相显微组织的硬度。根据 GB4342—84 规定，维氏显微硬度施加的载荷为 0.0981 (0.01)、0.1961 (0.02)、0.4903 (0.05)、0.9807 (0.1)、1.961 (0.2) N (kgf)，测量压痕对角线长度用 μm 作单位，符号仍用 HV 表示。由于显微硬度载荷小、压痕很小，可以测定金属箔、金属粉末、极薄表层及金属组织中的晶粒及合金组成相的硬度值。

由于各种硬度试验的条件不同，因此相互之间没有理论换算关系。但根据试验结果，可得到粗略换算公式：