

材料力学性能

彭瑞东 编著



机械工业出版社

本书比较全面和系统地介绍了固体材料在外加载荷及环境因素作用下的变形破坏特点以及相应的力学性能指标表征方法和测试方法。本书绪论中对一些描述力学状态及行为的基本概念做了简要介绍,然后分3篇详细介绍了材料力学性能的有关知识。第1篇为材料力学性能的试验评测,第1~8章。该篇内容主要围绕材料力学性能的试验测试方法展开,介绍了拉伸、压缩、扭转、弯曲、剪切等静载试验以及硬度试验方法,动态力学分析、疲劳、冲击等动载试验以及摩擦磨损试验方法,还有材料的缺口敏感性试验、断裂韧性试验、疲劳裂纹扩展试验以及环境温度和介质影响下的试验。这一部分旨在描述材料的各种力学行为,并测定相应的力学性能指标。第2篇为材料力学行为的机理分析,第9~11章。该篇内容主要围绕材料变形破坏的规律和机理展开,介绍了材料的弹性变形、塑性变形以及断裂和损伤。这一部分旨在解释材料各种力学行为的特点和机制,并探讨相应的影响因素,揭示材料力学性能的共性规律。第3篇为典型材料的力学性能特点,第12~13章。该篇内容主要分析了不同种类材料的力学性能特点,包括金属材料、陶瓷材料、高分子材料、复合材料、岩土材料等。第3篇是前两篇内容的综合应用,并进一步补充说明了各种材料的一些个性规律。这种架构体现了从现象到本质、再到应用的工程科学思想。本书着力强调宏观规律与微观机理的结合,注重各种力学性能指标的测试方法和物理意义研究,对材料的变形和破坏规律进行了科学的分类和比较。

本书可作为材料科学与工程、工程力学、机械、采矿、化工等专业本科生的教材,也可作为相关专业研究生、教师、科研人员及工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学性能/彭瑞东编著. —北京:机械工业出版社,2017.12
ISBN 978-7-111-58398-1

I. ①材… II. ①彭… III. ①材料力学性质 IV. ①TB303.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第320126号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:赵红梅 责任编辑:赵红梅 杨璇 责任校对:肖琳
封面设计:马精明 责任印制:
印刷厂印刷

2018年1月第1版第1次印刷
184mm×260mm·22印张·537千字
0001— 册
标准书号:ISBN 978-7-111-58398-1
定价: 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

前言



人类的文明史，就是一部人类利用材料改造自然的历史。人类从最早只能利用石块、树枝，发展到冶炼并使用铜、铁、钢等各种金属材料，20 世纪初又出现并开始使用塑料、橡胶等高分子材料。目前，人类已经可以制造并使用纳米材料。综观历史，充分研究并合理认识材料的性能，对于更为有效地利用已有材料以及开发新的材料都是大有裨益的。

材料力学性能是材料性能的一个重要方面，是对材料变形和破坏行为的表征。对材料力学性能的研究也是对材料所有性质的研究中较为透彻和成熟的。因为不管是石器时代还是青铜器时代，人类最初利用材料都是力学方面的应用。发展至今，材料力学方面的应用仍是最广泛和最基础的。不过，对材料的力学研究比对材料力学方面的应用要晚得多。最初，人们根据建筑和机械制造的要求去积累材料的宏观力学性能，然后借此经验去选材、设计，这是相当粗糙的，直至后来数学和物理学的发展，人类才开始定量研究材料的宏观力学性能。如今，随着物理学、化学的蓬勃发展，随着材料科学、信息科学的日新月异，通过各种先进的检测技术，人类对材料力学性能的研究也越来越深入，越来越完善。借助高性能计算机，人类可以迅速完成对某一复杂结构的力学计算，优选出合理的方案。借助各种电子显微镜，人类可以了解材料力学行为的微细观状况，进而揭示材料力学性能的内在机理。

研究揭示材料变形破坏的力学行为特点和规律不仅是材料学和力学研究的重点，也是诸多相关工程实践中的一个基本科学问题。材料的力学行为表征和控制是一个涉及材料科学、力学、物理学、化学、冶金、机械、化工、测控、安全等诸多学科的交叉领域。各种工程技术的发展对材料的力学稳定性和安全性提出了越来越高的要求，而现代测试技术以及材料加工技术的发展也为材料满足这些要求提供了保障。随着科技的发展，材料力学性能的研究也不断深入，从而得以更加科学合理地控制材料的变形破坏过程。

材料力学性能作为相关专业的一门专业基础课，在培养相关领域的科研人员和工程技术人员方面发挥着重要的作用。了解和掌握材料的力学行为规律和性能特点，不仅是材料制备和加工的基础，也是合理开展力学分析的基础。随着材料学的蓬勃发展，各种新材料层出不穷，既有材料的潜能也不断得以提升。随着力学的蓬勃发展，各种新理论不断涌现，既有理论的局限性也不断得以修正。编者在多年的教学过程和科研过程中积累了一些心得体会，深感这门课程涉及面极广，不仅有许多经典的概念和方法需要认真学习掌握，也有不少新兴的概念和方法值得了解和借鉴。尽管目前国内外有许多相关的教材，其中不乏经典传世之作，也有一些新颖独特的专著，这些都让人受益匪浅。编者

还是希望能将这十几年的教学与科研体会整理出来,通过本书与大家交流,希望能对学习和了解材料的力学性能特点有所帮助。

在本书的编撰过程中,编者力求既能涵盖相关的基本知识,又能体现一些最新知识。限于许多本科高校教学学时设置,为了便于学生自学,本书尽可能对各个知识点给出详尽解释说明,力图做到浅显易懂。

首先,本书绪论对一些描述力学状态及行为的基本概念做了简要介绍,包括载荷与应力、变形与应变,以及材料力学性能的概念。然后,为适用不同的需求,本书又分3篇进行介绍,但这3篇并不是彼此独立的,而是有机联系在一起的。

第1篇为材料力学性能的试验评测,从第1章到第8章。该篇内容主要围绕材料力学性能的试验测试方法展开,介绍了拉伸、压缩、扭转、弯曲、剪切等静载试验以及硬度试验方法,动态力学分析、疲劳、冲击等动载试验以及摩擦磨损试验方法,还有材料的缺口敏感性试验方法、断裂韧性试验方法、疲劳裂纹扩展试验方法以及环境温度和介质影响下的试验方法。这一部分旨在描述材料的各种力学行为,并测定相应的力学性能指标。通过介绍一系列试验测试方法,有助于在感性层面了解材料在不同载荷、不同环境下的力学行为特点,并掌握表征这些力学行为的一些性能指标。对于大部分工程技术人员,学习这一部分内容后即可开展相关的试验测试工作。

第2篇为材料力学行为的机理分析,从第9章到第11章。该篇内容主要围绕材料变形破坏的规律和机理展开,介绍了材料的弹性变形、塑性变形以及断裂和损伤,旨在解释材料各种力学行为的特点和机制,并探讨相应的影响因素,揭示材料力学性能的共性规律。该篇内容采用宏观规律与微观机理相结合的方法来分析材料为什么会出现各种各样的力学行为,以及影响这些行为的内在因素和外在因素。具备一定的力学和材料学知识将有助于学习和理解这一部分的内容。只有掌握了分析材料变形破坏规律和机理的方法,才能更加能动地完成第1篇介绍的试验测试工作,才能对试验测试过程中观察到的现象做出科学合理的解释。这也是在工程实践中解决材料变形破坏问题的基础。只有掌握了这些基本方法,才能科学合理地分析各种工程材料的力学性能特点,才能科学合理地实现材料的增强增韧,才能科学合理地选用材料以避免失效破坏。

第3篇为典型材料的力学性能特点,第12章和第13章。该篇内容主要围绕典型材料的结构特点分析了各自的力学性能特点,包括金属材料、陶瓷材料、高分子材料、复合材料、岩土材料等。本篇是前两篇内容的综合应用,并进一步补充说明了各种材料的个性规律。同时,这些内容也与相关专业的专业课相衔接,可供读者初步了解不同专业的研究对象,并从中得到启发并加以借鉴。

这种架构遵循了从具体到抽象再到具体的科学研究规律,体现了从现象到本质再到应用的工程科学思想。需要说明的是,3篇的内容不是彼此割裂的。第1篇以试验测试为主,重点介绍力学性能指标的定义和测定方法;第2篇以理论分析为主,重点阐释力学性能指标的意义和影响因素;第3篇以实际应用为主,重点阐释力学性能指标的评价和作用。

本书的内容遵循了大部分材料力学性能教材的主要内容,涵盖了基本静载试验、硬度试验,以及疲劳、冲击、蠕变、环境腐蚀等载荷工况,解释了弹性变形、塑性变形、

断裂等力学行为特点。此外，本书在试验部分和理论分析部分又增加了一些重要内容。在试验方面，增加了有关动态力学分析的内容，将其与疲劳相衔接，构成了材料的振动与疲劳这一章，分别解决周期载荷下黏弹性变形和疲劳破坏的问题。在冲击破坏这章中增加了有关 SHPB 冲击试验的介绍，充实了动态试验测试方法。对于断裂韧性试验、疲劳裂纹扩展试验、摩擦磨损试验也给予了相对比较详细的介绍。在理论分析部分，增加了有关损伤力学的内容。最后本书对包括岩土材料在内的各种结构材料的力学性能特点进行了简要介绍。

本书是编者在多年教学经验和教学资料的基础上整理完善、编写而成，期间得到了诸多专家学者的指正，他们提出了许多宝贵的意见，为本书的最终定稿提供了很多帮助，编者谨在此表示衷心感谢。在本书编写过程中，参考了国内外一些教材、专著以及论文，引用了一些网络资料，在此向所有作者表示感谢。

由于编者的水平有限，书中难免会有错误和纰漏，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第 1 篇 材料力学性能的试验评测

第 1 章 材料在单向静拉伸下的力学

性能测试

1.1 单向拉伸试样及应力场分析	13
1.2 拉伸曲线	15
1.3 拉伸性能指标	24
1.4 拉伸断口与断裂方式	36
1.5 单向静拉伸试验的特点	37

第 2 章 材料在其他静载下的力学性能

测试

2.1 加载方式与应力状态	38
2.2 单向压缩	41
2.3 扭转	44
2.4 弯曲	50
2.5 剪切	53
2.6 多向拉伸与压缩	55

第 3 章 材料的硬度

3.1 硬度测量的特点	58
3.2 布氏硬度	59
3.3 洛氏硬度	63
3.4 维氏硬度	66
3.5 显微硬度	68
3.6 肖氏硬度和里氏硬度	69
3.7 莫氏硬度	70

第 4 章 材料的振动与疲劳

4.1 动态力学分析	72
4.2 疲劳现象与特点	82

4.3 疲劳曲线	87
4.4 疲劳强度	91
4.5 循环应力-应变曲线	97
4.6 应变疲劳曲线	100
4.7 高周疲劳和低周疲劳	101

第 5 章 材料的冲击破坏

5.1 冲击载荷的特点	103
5.2 材料的应变率	105
5.3 冲击试验与吸收能量	106
5.4 SHPB 冲击试验与应力波分析	112
5.5 膨胀环试验	119

第 6 章 缺口试样的力学性能

6.1 缺口效应	121
6.2 应力集中系数	125
6.3 缺口敏感性试验	129
6.4 断裂韧性测定试验	135
6.5 疲劳裂纹扩展试验	146

第 7 章 材料在特殊环境下的力学性能

7.1 材料在高温下的力学性能	151
7.2 材料的低温脆性与韧脆转变	159
7.3 材料的抗热震性	163
7.4 环境介质中的材料力学性能试验	165

第 8 章 材料的摩擦磨损

8.1 材料表面的性状及检测	175
8.2 材料表面的接触和摩擦	200
8.3 材料的磨损试验	204

第 2 篇 材料力学行为的机理分析

第 9 章 弹性变形	212
9.1 弹性变形的物理机制	212

9.2 广义胡克定律	213	第 11 章 断裂和损伤.....	267
9.3 弹性模量	217	11.1 断裂的基本特点	267
9.4 弹性不完善性	229	11.2 脆性断裂	270
第 10 章 塑性变形	234	11.3 韧性断裂	276
10.1 塑性变形的物理机制	234	11.4 材料的韧脆转变	280
10.2 单向拉压下材料的塑性变形	246	11.5 断裂强度	284
10.3 塑性变形的影响	251	11.6 断裂韧度	288
10.4 屈服强度	254	11.7 材料的损伤	298
10.5 形变强化	263		
第 3 篇 典型材料的力学性能特点			
第 12 章 工程材料的力学性能	304	第 13 章 岩土材料的力学性能	317
12.1 金属材料的力学性能	304	13.1 岩石的力学性能	317
12.2 陶瓷材料的力学性能	305	13.2 土的力学性能	321
12.3 高分子材料的力学性能	307	13.3 混凝土的力学性能	326
12.4 复合材料的力学性能	315		
附录	329	附录 C 相关国家标准	338
附录 A 一些常见的材料力学性能参数	329	附录 D 相关专业术语及其符号	340
附录 B 几种常见的应力集中情况	335	参考文献	343

材料的硬度是材料的重要力学性能指标之一，其反映了材料的相对软硬程度。正因为硬度是一个相对的量，所以硬度的大小不仅与材料的成分和组织有关，还取决于测量方法和条件。测定硬度的方法很多，主要分为压入法、回跳法和刻划法三大类。所谓“布氏”“洛氏”“维氏”“肖氏”“莫氏”硬度等，是以首先提出这种硬度试验方法的人的姓氏或以首先生产这种硬度计的厂家名称来命名的。硬度测定简便，造成的表面损伤小，基本属于“无损”检测的范畴，可直接在零部件上测量，而且硬度同材料的其他力学性能指标之间存在一定的关系，因此在工程应用中，硬度测量被广泛采用，尤其是在现场实时检测中更为有效。但硬度对材料的内部组织不敏感，更大程度上反映的是材料表层的力学性能，与材料的耐磨性和耐久性关系更大。

3.1 硬度测量的特点

硬度试验按测量方法的不同可分为压入法、回跳法和刻划法三大类。表 3-1 列出了几种常见的硬度试验方法及其特点。

压入法是将特定的压头以一定压力压入材料的表面，然后测量材料表面留下的压痕的尺寸。压痕越大、越深则硬度越低。根据压头和测量方法的不同又可分为布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度和显微维氏硬度等。压入法测得的硬度表征材料表面抵抗外载时引起塑性变形的能力。硬度大，变形抗力也大。压入硬度试验方法的应力状态软性系数 $\alpha > 2$ 。在这样的应力状态下，几乎所有材料都能产生塑性变形。因此这种方法不仅可以测定塑性金属材料的硬度，也可测定淬火钢、硬质合金甚至陶瓷等脆性材料的硬度。

回跳法是使特定的小球被材料表面反弹，然后测量弹起的高度，回跳高度越大则硬度越高，如肖氏硬度。回跳法测得的硬度表征材料弹性比功的大小。对变形能力的反映则依赖于材料的弹性模量。

刻划法是通过不同硬度的材料相互在表面刻划，根据留下的划痕来确定硬度的相对大小，如莫氏硬度。刻划法测得的硬度表征材料表面对破坏的抗力。

压入硬度的测量属于静力测定法，而回跳硬度的测量则属于动力测定法。

由此可见，硬度不是一种基本力学性能指标，根据测量方法不同，分别与材料的塑性变形、弹性比功和破坏抗力有关。因此在比较不同材料的硬度时要注意硬度测量方法的一致性。

表 3-1 几种常见的硬度试验方法及其特点

试验方法		标记	计算方法	硬度单位	特 点
测定原理	硬度类别				
压入法	布氏硬度	HBW	$HBW(F/D^2, d)$	kgf/mm^2	稳定、精度高,但不宜测定高硬度及薄材
	洛氏硬度	HRC HRA	$HRC/HRA = (0.2 - e)/0.002$	度	效率高、检测范围广,但可比性差
		HRB	$HRB = (0.26 - e)/0.002$		
		HR15N HR15T	$HR = (0.1 - e)/0.001$		
	维氏硬度	HV	$HV = 1.854F/d^2$	kgf/mm^2	可比性好、范围广、精度高,但效率不高
	显微维氏硬度	HV	$HV = 1.854F/d^2$	kgf/mm^2	微、薄件测定
	努氏硬度	HK	$HK = 14.22F/l^2$	kgf/mm^2	
回跳法	肖氏硬度	HS	$HS = Kh/h_0$	度	迅速,但结果分散
刻划法	莫氏硬度		10 级互比	级	定性描述

对于硬度和其他力学性能指标之间的关系，在不同的测量方法下，针对不同材料也给出了一些经验公式，这为通过简便易行的硬度测量来推断材料的其他力学性能带来方便。

尽管各种不同的硬度之间可以进行比较和换算，并有专门的国家标准（见附录 A）。但是这样的换算可能带来不必要的麻烦或者错误，因此要尽可能采用相同的硬度测量方法来进行比较，这种不同硬度之间的换算只能作为参考。

3.2 布氏硬度

布氏硬度试验是应用最久，也是最为广泛的压入法硬度试验之一，最早于 1900 年由瑞典工程师布利奈尔（J. B. Brinell）提出。

3.2.1 布氏硬度的试验方法和测定原理

测定布氏硬度时，用一定的压力将硬质合金球压头压入试样表面，保持规定时间后卸除压力，于是在试样表面留下压痕（图 3-1），计算单位面积上所承受的平均压力即定义为布氏硬度，记为 HBW。以前使用淬火钢球做压头时的布氏硬度记为 HBS。

已知施加的压力为 F ，压头直径为 D ，测得压痕深度为 h （实际中测压痕直径 d 要比测压痕深度 h 方便），即可求出布氏硬度为

$$HBW = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi Dh} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \tag{3-1}$$

布氏硬度测试在布氏硬度试验机上进行，测试时必须保持所加压力与试样表面垂直，施加压力应均匀平稳，不得有冲击和振动。为使用方便，按上式制出布氏硬度数值表，测得压痕直径后，即可查表求出布氏硬度 HBW。布氏硬度的试验方法和技术条件详见国家标准

GB/T 231—2009。

与布氏硬度的试验原理一样，如将压痕的表面积改为压痕的投影面积，则可得到梅氏（Meyer）硬度 HM，即

$$HM = \frac{4F}{\pi d^2} \quad (3-2)$$

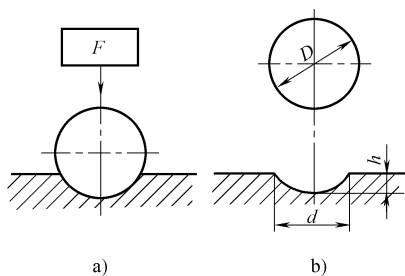


图 3-1 布氏硬度测定原理

a) 压入 b) 卸除压力

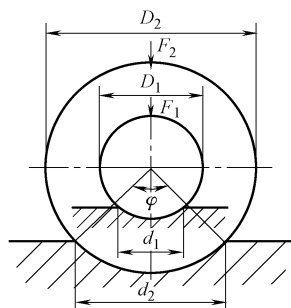


图 3-2 压痕几何相似示意图

3.2.2 压痕相似性规律

由于材料的硬度差别较大，试样厚度也不尽相同，若只采用一种压力 F 和一种压头直径 D ，就有可能导致压痕太浅或过深，前者 d 值不易测准，后者 d 值受试样垫块硬度影响。因此通常限定 d 与 D 的比值为 $0.24D < d < 0.6D$ ，所以需要采用不同直径的球和不同的压力。这样一来，为使同一材料的布氏硬度在不同的 F 和 D 下相同，以及不同材料的布氏硬度具有可比性，就需要遵循相似性规律。如图 3-2 所示，压痕直径 d 与压头直径 D 存在关系 $d = D \sin(\varphi/2)$ ，其中 φ 是压入角。则布氏硬度为

$$HBW = \frac{F}{\pi D^2} \cdot \frac{2}{1 - \sqrt{1 - \sin^2(\varphi/2)}} \quad (3-3)$$

可见在不同压力 F 和压头直径 D 下，只要保证 F/D^2 为一常数，若同一材料的布氏硬度相同，则压入角相等，从而不同材料的布氏硬度也就具有了可比性。布氏硬度应用很广，在力的单位采用 kgf 时就积累了大量数据，为了沿用这一批数据，现在计算布氏硬度时仍采用 kgf 为压力 F 的单位，mm 为球径 D 的单位，保证 F/D^2 的取值为定值（通常有六种，即 30kgf/mm^2 ， 10kgf/mm^2 ， 5kgf/mm^2 ， 2.5kgf/mm^2 ， 1.25kgf/mm^2 和 1kgf/mm^2 ），见表 3-2。需要指出的是，试验测得的 d 与 D 的比值应符合 $0.24D < d < 0.6D$ ，否则试验结果无效，需重新调整 F 与 D 的大小或 F/D^2 的值。在新的国家标准中采用了国际单位，这时需对 F 乘以系数 0.102。

表 3-2 布氏硬度试验的 F/D^2 值选择表

（单位：kgf/mm²）

材料	铸铁		铜及其合金			轻金属及其合金						铅、锡		钢、镍合金、钛合金	
布氏硬度范围	<140	>140	<35	35~130	>130	<35		35~80			>80		—		—
F/D^2	10	30	5	10	30	1.25	2.5	5	10	15	10	15	1	1.25	30

3.2.3 布氏硬度的表示方法

除了 F/D^2 的取值，试验时的压力保持时间也对材料的布氏硬度有影响，因此在压力作用下的保持时间也有规定。通常对黑色金属为 10s，有色金属为 30s，对 $\leq 35\text{HBW}$ 的有色金属为 60s。这是因为测定较软材料的硬度时，会产生较大塑性变形，因而需要保持较长时间，使其塑性变形发展充分。不同试样厚度下布氏硬度试验条件的选择见表 3-3。

此外，还应注意，钢球只适于布氏硬度小于 450 的材料，而布氏硬度大于 350（特别是大于 450）但小于 650 时需用硬质合金球。

表 3-3 不同试样厚度下布氏硬度试验条件的选择

材料类型	布氏硬度 HBW	试样厚度/mm	F/D^2 /(kgf/mm ²)	压头直径 D /mm	压力 F /kgf	压力保持时间/s
黑色金属	140~450	6~3	30	10	3000	10
		4~2		5	750	
		<2		2.5	187.5	
	<140	>6	10	10	1000	10
		6~3		5	250	
		<3		2.5	62.5	
有色金属	>130	6~3	30	10	3000	30
		4~2		5	750	
		<2		2.5	187.5	
	36~130	9~3	10	10	1000	30
		6~2		5	250	
		<3		2.5	62.5	
	8~35	>6	2.5	10	250	60
		6~3		5	62.5	
		<3		2.5	15.6	

综上所述，为使材料的布氏硬度具有可比性，试验测得的结果应标记为以下形式，即

布氏硬度

HBW

硬质合金球直径 D / 压力 F / 压力保持时间

例如：150HBS10/3000/30 表示用直径为 10mm 的淬火钢球加压 3000kgf（29.4kN）保持 30s 测得的布氏硬度为 150；500HBW5/750 表示用直径为 5mm 的硬质合金球加压 750kgf（7.35kN）保持 10~15s 测得的布氏硬度为 500。通常，当压力保持时间为 10~15s 时不予标注。

3.2.4 布氏硬度与抗拉强度

试验证明，在一定条件下，材料的布氏硬度与抗拉强度存在如下经验关系式，即

$$\sigma_t = k\text{HBW}$$

(3-4)

式中， k 是经验常数，随材料不同而异。表 3-4 列出了常见金属材料的抗拉强度与布氏硬度的比例常数 k 。因此，测定了布氏硬度，即可估算出材料的抗拉强度。相类似，布氏硬度与疲劳极限之间也存在一定的近似关系 $\sigma_{-1} = \alpha\text{HBW}$ ，见表 3-5。

对于不会发生形变强化的延性材料，可以证明 HM 约等于 $3\sigma_s$ ，其中 σ_s 是单轴屈服强度， HM 和 σ_s 的单位均用 MPa 。

从数值上看，材料的布氏硬度大于其屈服强度，这是因为在压痕形成之前压头下方的所有材料都必须发生屈服，而且布氏硬度的计算采用的是压痕球面面积。

表 3-4 常见金属材料的抗拉强度与布氏硬度的比例常数 k

材 料	HBW 范围	$k=\sigma_t/HBW$	材 料	HBW 范围	$k=\sigma_t/HBW$
退火、正火碳钢	125~175	3.4	退火铜及黄铜 加工青铜及黄铜 冷作青铜	—	5.5
	>175	3.6		—	4.0
淬火碳钢	<250	3.4		—	3.6
淬火合金钢	240~250	3.3	软铝 硬铝 其他铝合金	—	4.1
正火镍铬钢	—	3.5		—	3.7
锻轧钢材	—	3.6		—	3.3
灰铸铁	$\sigma_t \geq 200MPa$	HB = RH (100+0.438 σ_t)	锌合金	—	0.9
	$\sigma_t < 200MPa$	HB = RH (44+0.724 σ_t)			

注：1. 抗拉强度 σ_t 单位为 MPa 。
2. RH 为相对硬度值，一般为 0.8~0.12，由原材料、熔炼工艺、处理工艺及铸件冷却速度等因素确定。

表 3-5 常见金属材料的布氏硬度与抗拉强度及疲劳极限的关系

金属及合金名称		HBW	σ_t/MPa	$k(\sigma_t/HBW)$	σ_{-1}/MPa	$\alpha(\sigma_{-1}/HBW)$
有色金属	铜	47	220.30	4.68	68.40	1.45
	铝合金	138	455.70	3.30	162.68	1.18
	硬铝	116	454.23	3.91	144.45	1.24
黑色金属	工业纯铁	87	300.76	3.45	159.54	1.83
	20 钢	141	478.53	3.39	212.66	1.50
	45 钢	182	637.98	3.50	278.02	1.52
	T8 钢	211	753.42	3.57	264.30	1.25
	T12 钢	224	792.91	3.53	338.78	1.51
	12Cr18Ni9	175	902.28	5.15	364.56	2.08
	20Cr13	194	660.81	3.40	318.99	1.64

3.2.5 布氏硬度的特点和适用范围

由于布氏硬度测量时压痕面积较大，能较好地反映较大体积范围内的综合平均性能，故而其数值比较稳定，分散性小，重复性好。

但也正由于压痕面积较大，布氏硬度适用于有较大晶粒或组成相的材料，而且试样不能过薄。因此不适宜于测定薄件或表面硬化层的布氏硬度。

此外，布氏硬度的缺点是对不同材料需要更换压头直径和改变试验压力，而且测量时需保持压力一定时间，压痕直径的测量也较麻烦，所以布氏硬度在批量检测和快速检测时不太适宜。

3.3 洛氏硬度

洛氏硬度试验也是最为广泛的压入法硬度试验之一，最早在 1919 年，美国的洛克威尔 (S. P. Rockwell 和 H. M. Rockwell) 提出了直接用压痕深度来衡量硬度的方法。

3.3.1 洛氏硬度的试验方法和测定原理

洛氏硬度是直接测量压痕深度并以压痕深浅表示材料的硬度，这是与布氏硬度定义的主要区别。

常用的洛氏硬度压头有两类，分别是顶角为 120° 的金刚石圆锥或直径为 1.588mm ($1/16\text{in}$) 的钢球。测量时，先施加一定预压力 (通常为 10kgf)，得到一初始压痕深度 h_0 ；随后施加主压力，压痕深度增加 h_1 ，它包括弹性变形和塑性变形两部分；卸除主压力后，弹性变形部分恢复，压头回升一段距离，得到在预压力下的残余压痕深度 h ，以 h 的大小计算洛氏硬度，如图 3-3 所示。为使计算结果符合思维习惯，即硬度大洛氏硬度也大，用一人为规定的长度 (通常为 0.2mm) 减去 h ，并规定 0.002mm 的残余压痕深度为一个硬度单位 (简称为度)，由此定义洛氏硬度为

$$\text{HRC} = \frac{0.2 - h}{0.002} (\text{硬度单位}) \quad (3-5)$$

实际使用的洛氏硬度计，其测量压痕深度的百分表表盘上的刻度已根据这一线性关系式换算成相应的洛氏硬度，因此试验时在主压力卸除后即可由百分表指针位置直接读出洛氏硬度。洛氏硬度的试验方法和技术条件详见国家标准 GB/T 230—2009。

3.3.2 洛氏硬度的各种标尺

为了能在一台洛氏硬度计上测定不同软硬、不同厚薄试样的硬度，可采用不同压头及试验力组合成的几种不同的洛氏硬度标尺。洛氏硬度有九种不同的标尺，用洛氏硬度符号 HR 后面加标尺字母表示，字母开始有 A、B、C、D、E、F、G、H、K 九个，后来又发展了 L、M、P、R、S、V 六个，见表 3-6。不同标尺表示不同的实验条件和计算方法。常用的为 HRA、HRB、HRC 三种。

HRC 标尺和 HRA 标尺的硬度计算方法是相同的，考虑到个别情况下残余压痕深度可能大于 0.2mm ，为避免出现硬度为负，定义了 HRB 标尺，其计算方法是按 HRC 或 HRA 计算方法计算出后再加 30 个硬度单位，这就相当于

$$\text{HRB} = \frac{0.26 - h}{0.002} (\text{硬度单位}) \quad (3-6)$$

也就是说，HRC 标尺和 HRA 标尺的满刻度为 100 度，HRB 标尺的满刻度为 130 度。

总之洛氏硬度可统一定义为

$$\text{HR} = K - \frac{h}{0.002} (\text{硬度单位}) \quad (3-7)$$

式中， K 是常数，采用金刚石圆锥压头时为 100，采用钢球压头时为 130，见表 3-6。实际测量洛氏硬度时，可由硬度计压头上的百分表表盘直接读出。

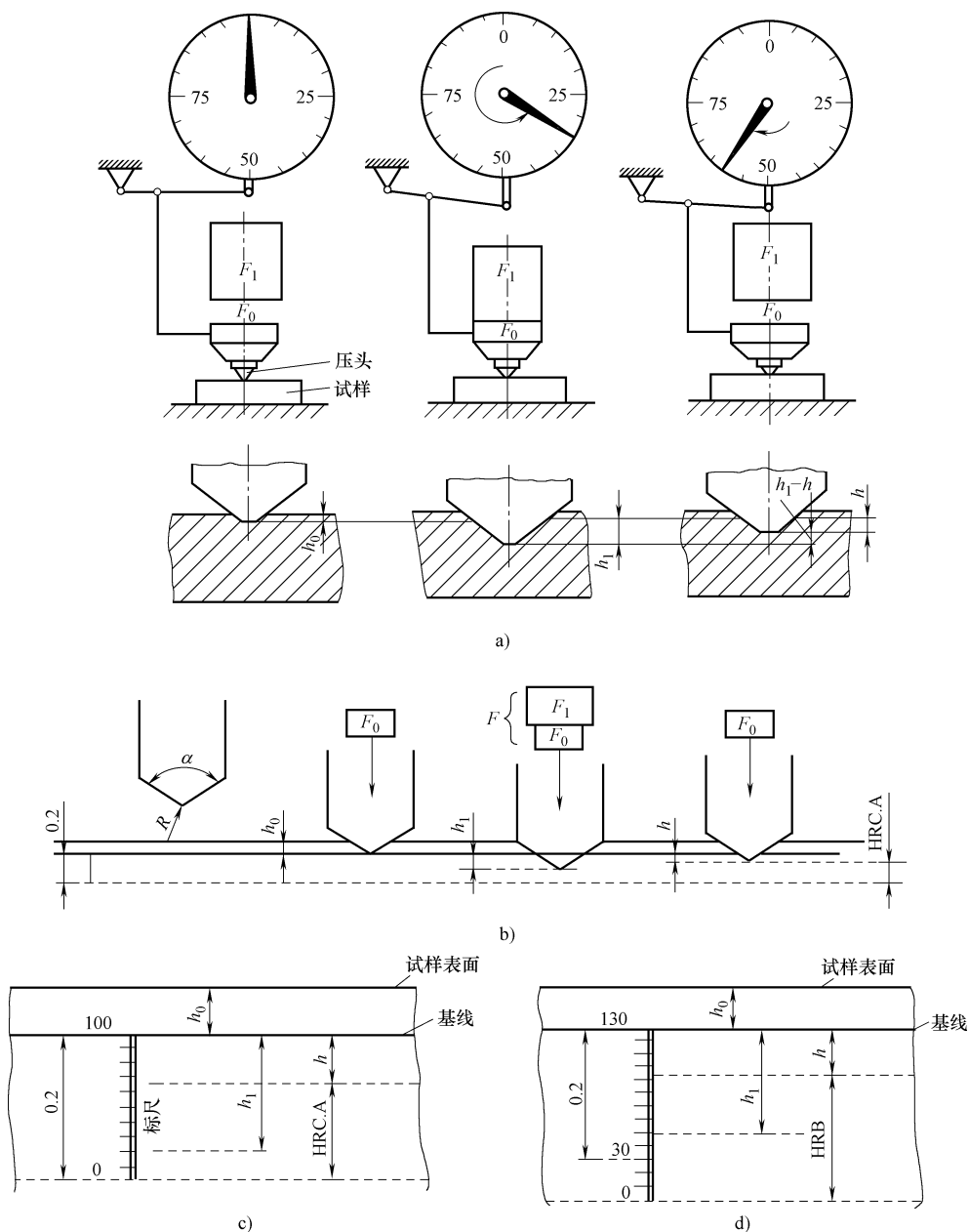


图 3-3 洛氏硬度测定原理

a) 试验过程 b) 各级载荷与压痕深度变化示意图 c) HRC 和 HRA 计算 d) HRB 计算

洛氏硬度的标记比较简单，采用硬度加标尺符号的方法。例如：45HRC 表示采用洛氏硬度 C 标尺测定的硬度为 45 度。

洛氏硬度测试时，试样表面应为平面。若在圆柱面或球面上测定洛氏硬度，得到的压痕偏深，致使测得的硬度比实际要低，需将测试结果加以修正。洛氏硬度 C 标尺下的修正量为

$$\Delta \text{HRC} = \frac{k(100 - \text{HRC}')^2}{D} \quad (3-8)$$

(续)

分级顺序	材料	分级顺序	材料
4	氟石	4	氟石
5	磷灰石	5	磷灰石
6	正长石	6	正长石
7	石英	7	SiO ₂ 玻璃
8	黄玉	8	石英
9	刚玉	9	黄玉
10	金刚石	10	石榴石
—		11	熔融氧化锆
		12	刚玉
		13	碳化硅
		14	碳化硼
		15	金刚石

可见，莫氏硬度实际上是一种比较硬度。硬度并非绝对硬度，而是按硬度的顺序表示的值。鉴于上述矿物有时不易找到，试验时可近似选取表 3-10 列出的材料来比较莫氏硬度。

表 3-10 常见材料的莫氏硬度

常见材料	皮肤	指甲	黄金、银	黄铜	钢刀	牙齿	玻璃
莫氏硬度	1.5	2.5	2.5	3.5	5.5	6	6.5

类似的方法还有刻划硬度，这也可视为莫氏硬度的一种扩展，即用划痕的宽度来表示硬度。具体做法是用 90°圆锥角的金刚石锥施加一定载荷压入试样表面，然后沿水平方向拖动，在试样表面划出划痕，用显微镜测量划痕宽度，将宽度的 μm 值表示为硬度。这种方法会在试样表面留下比较长的划痕，所以尽可能找非常清晰的地方测量，或者是多处测量取平均值，试验数据比较准确，但也对试样表面造成一定损伤。刻划硬度可以比较准确地反映材料抵抗剪切的能力，测量数据与材料的加工硬化等没有关系。表 3-11 列出了黄铜（70% Cu+30% Zn）在不同轧制变形量下的刻划硬度、布氏硬度和肖氏硬度。

表 3-11 黄铜（70% Cu+30% Zn）的硬度

轧制变形量(%)	0	15	30	50	70
布氏硬度 HBW	52	95	120	130	150
肖氏硬度 HS	26	36	42	52	62
刻划硬度	11	11	10.8	10.6	10.8

硬度试验的方法和设备很多，大多数具有相应的测试标准。具体应用中应根据待测试样的情况选择合适的检测方法。尤其在比较不同方法测定的硬度时，一定要慎重考虑相应的测量原理和硬度的可比性。