

普通高等院校机械类及相关学科规划教材

金属学与热处理

◎主编 陈丹 赵岩 刘天佑



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

金属学与热处理

主 编 陈 丹 赵 岩 刘天佑

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书共十章,主要介绍了金属的力学性能、金属的晶体结构、纯金属的结晶、二元合金的相结构与结晶、铁碳合金相图、三元合金相图、金属的塑性变形与再结晶、钢的热处理、工业用钢、铸铁等主要内容。

本书可作为本科冶金及热加工类专业的教学用书,也可供非材料专业(如机械制造)的学生以及相关工程技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

金属学与热处理/陈丹,赵岩,刘天佑主编. —北京:北京理工大学出版社,2017.11

ISBN 978-7-5682-4984-3

I. ①金… II. ①陈…②赵…③刘… III. ①金属学-高等学校-教材
②热处理-高等学校-教材 IV. ①TG1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第280698号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/20.75

字 数/490千字

版 次/2017年11月第1版 2017年11月第1次印刷

定 价/85.00元

责任编辑/封 雪

文案编辑/党选丽

责任校对/周瑞红

责任印制/李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

根据本科冶金类专业《金属学及热处理教程教学大纲》的要求，我们编写了《金属学与热处理》一书。本书可作为本科冶金及热加工类专业的教学用书，并可供冶金和热加工的现场工程技术人员参考。本书采用了国家近年来新颁布的相关标准，可按 80 教学学时课程安排，在使用本书时可根据不同院校自身的教学计划对书中的内容进行取舍。

本书主要包括：金属的力学性能、金属学基础、热处理基本原理和常用热处理工艺方法、工业用钢等。本书的任务在于使读者获得金属和合金的成分、组织结构和性能间的关系及其变化规律的基本理论、基本知识和基本技能；了解合金元素在金属材料中的作用和冶金产品的热处理原理及工艺方法；初步具备正确选择和合理使用金属材料的能力，为学习冶炼和热加工专业课，以及从事生产和科研工作奠定基础。

参加本书编写工作的有辽宁科技学院陈丹（第四章，第九章的第一、二、三、四节）、赵岩（第二章，第三章，第九章的第五、六节）、刘天佑（第五章）、王艳（第六章、第十章、第九章的第七节）、郭晓影（第八章）、河北建工学院刘继文（第一章、第七章）。本书由陈丹、赵岩、刘天佑担任主编。在编写过程中，编者参考和引用了一些文献中的内容，在此谨向这些文献的作者表示谢意。

全书由辽宁科技学院陈韧教授担任主审，参加审稿的还有马贺利教授、刘志明教授，他们对书稿提出了许多宝贵的建议。编者在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，书中存在疏漏和不妥之处，欢迎同行和读者批评指正。

编 者

2016 年 9 月

目 录

第一章 金属的力学性能	1
第一节 金属的强度和塑性	1
一、拉伸曲线	2
二、强度	2
三、塑性	3
第二节 硬度	5
一、布氏硬度	5
二、洛氏硬度	8
三、维氏硬度	9
四、显微硬度	10
五、肖氏硬度	11
六、里氏硬度	11
第三节 冲击韧度	13
一、冲击试验方法及原理	13
二、冲击试验的应用	16
第二章 金属的晶体结构	17
第一节 金属晶体中原子间的结合	17
一、金属原子的结构特点	17
二、金属原子间的结合方式(金属键)	17
第二节 金属晶体结构的基本知识	19
一、晶体结构概述	19
二、金属中常见的三种晶体结构	21
三、表示晶体结构特征的几何参数	22
四、晶面指数和晶向指数	26
五、晶体的各向异性	30
第三节 金属的实际晶体结构	31
一、点缺陷	31
二、线缺陷	33
三、面缺陷	35
第三章 纯金属的结晶	38
第一节 金属结晶的现象	38
一、纯金属的冷却曲线和过冷现象	38
二、纯金属的结晶过程	39

第二节 金属结晶的结构条件和热力学条件	40
一、金属结晶的结构条件	40
二、金属结晶的热力学条件	41
第三节 晶核的形成	42
一、自发形核	42
二、非自发形核	44
第四节 晶核的长大	45
一、晶核长大的条件	45
二、晶核长大的方式	46
三、晶核长大的形态	48
第五节 金属结晶后的晶粒大小	49
一、晶粒大小对性能的影响	49
二、影响晶粒大小的因素	50
三、细化铸件晶粒的方法	50
第六节 金属铸锭的组织及缺陷	51
一、铸锭的宏观组织	51
二、三个晶区的形成	52
三、铸锭缺陷	53
第四章 二元合金的相结构与结晶	56
第一节 合金的固态相结构	56
一、基本概念	56
二、合金的几种固态相结构	57
第二节 二元合金相图的基本知识	66
一、二元相图的表示方法	66
二、二元合金相图的测定方法	67
三、相律	68
四、杠杆定律	69
第三节 匀晶相图	70
一、相图分析	70
二、平衡结晶及其组织	70
三、不平衡结晶及枝晶偏析	71
四、成分过冷及晶体长大	74
五、固溶体合金的性能与成分（相图）的关系	76
第四节 共晶相图	78
一、相图分析	78
二、典型合金的平衡结晶及其组织	79
三、初晶和共晶组织的形态	84
四、不平衡结晶及其组织	86
五、密度偏析	88

六、共晶合金的性能与成分（相图）的关系	89
第五节 包晶相图	90
一、相图分析	90
二、典型合金的平衡结晶及其组织	91
三、合金的不平衡结晶及其组织	94
四、包晶转变对细化晶粒的作用	94
第六节 其他类型的二元合金相图	95
一、组元间形成化合物的相图	95
二、偏晶、熔晶和合晶相图	97
三、具有固态相变的二元合金相图	99
第五章 铁碳合金相图	102
第一节 铁碳合金的基本相	102
一、铁素体	102
二、奥氏体	103
三、渗碳体	103
第二节 相图分析	104
一、铁碳合金相图中的特性点	105
二、铁碳合金相图中的特性线	106
三、铁碳合金相图中的相区	108
第三节 典型合金的平衡结晶及其组织	108
一、工业纯铁	108
二、共析钢	109
三、亚共析钢	110
四、过共析钢	111
五、共晶白口铁	112
六、亚共晶白口铁	112
七、过共晶白口铁	114
第四节 含碳量对铁碳合金平衡组织和性能的影响	115
一、含碳量对平衡组织的影响	115
二、含碳量对力学性能的影响	116
第五节 铁碳相图的应用	117
一、作为选用钢铁材料的依据	117
二、在铸造生产方面的应用	117
三、在压力加工工艺方面的应用	118
四、在热处理方面的应用	118
第六章 三元合金相图	119
第一节 三元合金相图的成分表示方法	119
一、成分三角形（等边三角形）	119
二、成分三角形中具有特定意义的线	120

三、等腰三角形（等腰梯形）	121
四、直角三角形	121
第二节 三元系中的直线定律和重心法则	121
一、直线定律	122
二、重心法则	123
第三节 三元匀晶相图	123
一、相图分析	124
二、等温截面图	125
三、变温截面	126
第四节 简单的三元共晶相图	127
一、相图分析	127
二、等温截面	129
三、变温截面	132
四、投影图和合金结晶过程分析	133
第七章 金属的塑性变形与再结晶	135
第一节 金属的塑性变形	136
一、单晶体的塑性变形	137
二、多晶体的塑性变形	142
三、合金的塑性变形	144
第二节 冷塑性变形对金属组织和性能的影响	146
一、冷塑性变形对金属组织结构的影响	146
二、冷塑性变形对金属性能的影响	148
三、产生内应力	149
第三节 冷变形金属在加热时的变化	150
一、回复	150
二、再结晶	150
三、晶粒长大	152
四、冷变形金属的热处理	154
第四节 金属的热塑性变形（热变形加工）	155
一、金属的热变形加工和冷变形加工	155
二、热变形加工对金属组织和性能的影响	156
第八章 钢的热处理	159
第一节 概述	159
一、热处理及其应用	159
二、钢实际加热和冷却时的临界点	159
第二节 钢在加热时的转变	161
一、共析钢的奥氏体化	161
二、影响奥氏体化的因素	162
三、奥氏体晶粒的长大	164

第三节 钢在冷却时的转变	165
一、过冷奥氏体的等温转变	166
二、影响奥氏体等温转变的因素	175
三、过冷奥氏体的连续冷却转变	177
四、马氏体转变	180
第四节 钢的退火与正火	185
一、退火	185
二、正火	187
第五节 钢的淬火	189
一、淬火工艺	189
二、淬火方法	193
三、淬火缺陷及防止方法	194
第六节 钢的回火	196
一、回火的目的	196
二、淬火钢的回火转变	197
三、回火转变产物的组织与性能	199
四、回火的种类及应用	201
五、回火脆性	202
第七节 钢的淬透性	204
一、淬透性的概念	204
二、影响淬透性的因素	205
三、影响淬透层深度的因素	206
四、淬透性的测定与表示方法	206
五、淬透性的实际意义	209
第八节 钢的表面热处理	210
一、表面淬火	210
二、化学热处理	212
第九章 工业用钢	221
第一节 钢的分类	221
一、按化学成分分类	221
二、按钢的冶金质量分类	221
三、按金相组织分类	222
四、按冶炼方法分类	222
五、按用途分类	222
第二节 常存杂质元素对钢性能的影响	223
一、锰的影响	223
二、硅的影响	223
三、硫的影响	223
四、磷的影响	224

五、氮的影响	224
六、氢的影响	224
七、氧的影响	225
第三节 碳钢钢锭（钢坯）的组织及其宏观缺陷	225
一、镇静钢钢锭	225
二、沸腾钢钢锭	227
三、连铸坯	228
第四节 合金元素在钢中的作用	230
一、合金元素在钢中存在的形式	230
二、合金元素对 Fe-Fe ₃ C 相图的影响	232
三、合金元素对热处理组织转变的影响	234
第五节 结构钢	238
一、工程结构用钢	238
二、机器结构用钢	243
第六节 工具钢	264
一、刃具钢	264
二、模具钢	272
三、量具用钢	275
第七节 特殊性能钢	276
一、不锈钢	276
二、耐热钢	281
三、耐磨钢	285
第十章 铸铁	288
第一节 铸铁的石墨化	289
一、铁碳双重相图	289
二、石墨化过程	289
三、影响石墨化的因素	291
第二节 普通灰口铸铁	293
一、灰口铸铁的牌号、化学成分、组织和性能	293
二、灰口铸铁的孕育处理	296
三、灰口铸铁的应用	297
四、灰口铸铁的热处理	299
第三节 球墨铸铁	300
一、球墨铸铁的球化处理和孕育处理	300
二、球墨铸铁的牌号、化学成分、组织和性能	301
三、球墨铸铁的用途	303
四、球墨铸铁的热处理	304
第四节 可锻铸铁	307

一、可锻铸铁的生产	307
二、可锻铸铁的牌号、组织、性能及用途	308
第五节 蠕墨铸铁	310
一、蠕墨铸铁的获得	310
二、蠕墨铸铁的化学成分	310
三、蠕墨铸铁的牌号、组织、性能及应用	310
第六节 合金铸铁	312
一、耐磨铸铁	312
二、耐热铸铁	314
三、耐蚀铸铁	315
参考文献	317

第一章 金属的力学性能

金属材料的力学性能是指金属在外加载荷（外力或能量）或载荷与环境因素（温度、介质和加载速率）联合作用下所表现的行为，通常表现为金属的变形和断裂。因此，金属材料的力学性能可以简单地理解成金属抵抗外加载荷引起的变形和断裂的能力。

金属的力学性能取决于材料的化学成分、组织结构、冶金质量、残余应力及表面和内部缺陷等内在因素，但外在因素如载荷性质（静载荷、冲击载荷、交变载荷）、应力状态（拉、压、弯、扭、剪切、接触应力及各种复合应力）、温度、环境介质等对金属的力学性能也有很大的影响。金属的力学性能是工程结构和机器零件设计计算的重要依据，又是评定和选用金属材料及其加工工艺的重要依据。在冶金工厂的生产过程中，力学性能还是用以制订和改进生产工艺、控制产品质量的重要参数。

金属材料的力学性能包括强度、硬度、塑性、韧性、耐磨性和缺口敏感性等性能。因为机件的承载条件一般用各种力学参量（如应力、应力场强度因子、应变和冲击能量等）来表示，因此，人们便将表征金属材料力学行为的力学参量的临界值或规定值称为金属的力学性能指标，如强度指标 R_{eH} 、 R_{eL} 、 R_m ，塑性指标 Z 、 A ，韧性指标 a_k 等。金属材料力学性能的优劣就用这些指标的具体数值来衡量。金属材料的各种力学性能指标是通过实验来测定的。下面分别介绍这些力学性能指标。

第一节 金属的强度和塑性

单向静拉伸试验是工业上应用最广泛的力学性能试验方法之一。这种试验方法的特点是温度、应力状态和加载速率是确定的，并且常用标准的光滑圆柱试样进行试验。静拉伸试验可以测定用应力和应变表示的强度指标与塑性指标。按照 GB/T 228—2010《金属材料 拉伸试验》的规定，把规定尺寸和形状的金属试样（见图 1-1）装夹在万能材料试验机上，试样在拉伸负荷平稳增加下发生变形直至断裂。此时利用万能材料试验机上的自动绘图装置，可以绘出试样在拉伸过程中的伸长以及与载荷之间的关系曲线，习惯上称此曲线为试样的拉伸图，即 $F-\Delta L$ 曲线，也称拉伸曲线。由此曲线可测定金属的强度和塑性指标。

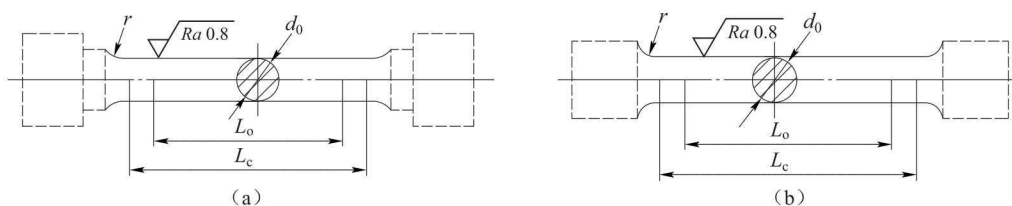


图 1-1 圆形拉伸试样（按夹具结构不同选择其中一种）

一、拉伸曲线

图 1-2 所示为低碳钢的拉伸曲线。由图可见, 载荷比较小时, 试样伸长随载荷增加而增加。当载荷超过 F_p 后, 拉伸曲线开始偏离直线。载荷在 F_e 以下阶段, 试样在加载时发生变形, 卸载后变形能完全恢复, 该过程为弹性变形阶段。当载荷超过 F_e 后, 试样在继续产生弹性变形的同时, 将产生塑性变形, 进入弹塑性变形阶段。当达到最大载荷 F_b 时, 试样产生颈缩。最后, 在载荷为 F_k 时, 试样产生断裂。试样由弹性变形过渡到明显塑性变形, 中间要经历屈服阶段, 拉伸曲线上出现平台或锯齿。钢的含碳量不同, 拉伸曲线的形状有所区别, 低碳钢有明显的屈服现象 (塑性材料), 高碳钢没有明显的屈服现象 (脆性材料)。通过拉伸试验可以揭示: 塑性材料在静载荷作用下, 变形过程一般可分为弹性变形、塑性变形和断裂三个阶段 (对于脆性材料, 只有弹性变形和断裂两个阶段)。

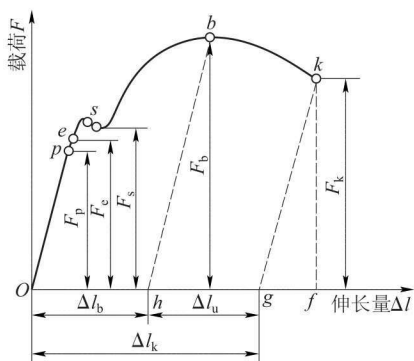


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线

二、强度

金属材料在静载荷作用下抵抗变形和断裂的能力称为强度。由于载荷的作用方式有拉伸、压缩、弯曲、剪切等多种形式, 所以强度也分为拉伸强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪切强度等。下面介绍的强度性能指标是国家标准 GB/T 228.1—2010 中的强度性能指标。

1. 规定塑性延伸强度

在 GB/T 228.1—2010 中, 引入了“规定塑性延伸强度”这一概念, 等于规定的引伸计标距 L_e 百分率时对应的应力, 用符号 R_p 表示, 使用此符号时应附下角标说明所规定的塑性延伸率, 例如, $R_{p0.2}$ 表示规定塑性延伸率为 0.2% 时的应力。

2. 规定总延伸强度

在 GB/T 228.1—2010 中, 引入了“规定总延伸强度”这一概念, 等于规定的引伸计标距 L_e 百分率时对应的应力, 用符号 R_t 表示, 使用此符号时应附下角标说明所规定的总延伸率, 例如, $R_{t0.5}$ 表示规定总延伸率为 0.5% 时的应力。

3. 规定残余延伸强度

在 GB/T 228.1—2010 中, 引入了“规定残余延伸强度”这一概念, 等于规定的原始标距 L_0 或引伸计标距 L_e 百分率时对应的应力, 用符号 R_l 表示, 使用此符号时应附下角标说明所规定的残余延伸率, 例如, $R_{l0.2}$ 表示规定残余延伸率为 0.2% 时的应力。

4. 屈服强度

屈服强度是指当金属材料呈现屈服现象时, 在试验期间达到塑性变形发生而力不增加的应力点。有上屈服强度和下屈服强度之分。

上屈服强度——试样发生屈服而力首次下降前的最大应力, 用符号 R_{eH} 表示。

下屈服强度——在屈服期间, 不计初始瞬时效应时的最小应力, 用符号 R_{eL} 表示。

试样经过屈服阶段再除去负荷, 部分变形不能恢复, 把这部分不能恢复的残余变形称为塑性变形。

屈服强度不仅是工程结构设计中使用的一个非常重要的数据,同时也是材料加工中必须考虑的一项材料基本指标。如果用变形方法制造具有某种形状的部件,那么,所施加的应力必须超过所用材料的屈服强度,才能使材料的形状发生永久的变化。

5. 抗拉强度

抗拉强度是指试样在拉断过程中最大力所对应的应力,用符号 R_m 表示。

抗拉强度在工程技术上是很重要的,因为它表示材料在拉伸条件下所能承受的最大外力,所以,它是零件和工件设计时的主要依据,同时也是评定金属材料的重要指标之一。

三、塑性

塑性是指材料产生塑性变形而不破坏的能力。

1. 伸长率

伸长率是原始标距的伸长与原始标距 L_0 之比的百分率。

残余伸长率是卸除指定的应力后,伸长相对于原始标距 L_0 的百分率。

断后伸长率是断后标距的残余伸长与原始标距之比的百分率,用符号 A 表示。

2. 延伸率

国家标准 GB/T 228.1—2010 还增加了“延伸”的概念,指试验期间任一给定时刻引伸计标距 L_e 的增量。引伸计标距 L_e 是指用引伸计测量试样延伸时所使用引伸计起始标距长度。

延伸率是用引伸计标距 L_e 表示的延伸百分率。

残余延伸率是试样施加并卸除应力后引伸计标距的增量与引伸计标距 L_e 之比的百分率。

屈服点延伸率是呈现明显屈服(不连续屈服)现象的金属材料,屈服开始至均匀加工硬化开始之间引伸计标距的延伸与引伸计标距 L_e 之比的百分率,用符号 A_g 表示。

最大力总延伸率是最大力时原始标距的总延伸(弹性延伸加塑性延伸)与引伸计标距 L_e 之比的百分率,用符号 A_{gt} 表示。

最大力塑性延伸率是最大力时原始标距的塑性延伸与引伸计标距 L_e 之比的百分率,用符号 A_g 表示。

断裂总延伸率是断裂时原始标距的总延伸(弹性延伸加塑性延伸)与引伸计标距 L_e 之比的百分率,用符号 A_t 表示。

3. 断面收缩率

断面收缩率是断裂后试样横截面积的最大缩减量与原始横截面面积的百分比,即:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 Z ——断面收缩率;

S_0 ——试样平行长度部分原始横截面面积;

S_u ——试样拉断后缩颈处的最小横截面面积。

通常, A 、 Z 的数值越大,材料的塑性越好。反之,材料的塑性越差,脆性越大。根据金属材料的伸长率 A 和断面收缩率 Z 的大小,很容易确定各种金属材料的塑性好坏。

4. 塑性指标的工程意义

按塑性指标可衡量材料的韧、脆性状态:

- 1) 当 $A < 3\% \sim 5\%$ 时为低塑性或脆性材料, 难以进行塑性加工成形, 如铸铁。
- 2) 当 $A > 15\%$ 时为高塑性材料, 压力加工性能好, 如 Cu、Al 等软金属, 低碳钢。
- 3) 当 $5\% < A < 15\%$ 时为一般塑性材料, 如高强度。

在设计零件时, 不但要依据受力情况和零件几何尺寸进行强度计算, 而且对材料强度提出要求, 同时还对材料的塑性提出要求。如汽车齿轮箱的传动轴, 选用中碳钢调质处理, 要求屈服强度为 $600 \sim 700 \text{ MPa}$, 同时还要求 A 不小于 6% 。这里对塑性的要求是出于安全考虑。在工作过程中, 零件难免会偶然过载, 或者应力集中部位的应力水平超过材料屈服点。这时, 材料如果具有一定的塑性, 则可用局部塑性变形松弛或缓冲其集中应力, 避免断裂, 保证安全。塑性对金属压力加工是很有意义的, 金属有了塑性才能通过轧制、挤压等冷变形工序生产出合格产品来; 为使机器装配、修复工序顺利完成, 也需要材料有一定的塑性; 塑性大小还能反映材料冶金质量的好坏, 故可用以评定材料的质量。

钢的强度、塑性与其含碳量有着密切关系。随着钢的含碳量的增加, 其强度增加而塑性减小。

钢的强度和塑性还与温度有关。一般来说, 温度越高, 强度越低, 塑性越好。所以, 钢在轧制和锻造时都将其加热到高温使其组织转变为塑性良好的奥氏体, 以便于塑性成形。

2002 年 3 月我国重新制定了新的国家标准 GB/T 228—2002 《金属材料 室温拉伸试验方法》, 代替原国家标准 GB/T 228—1987 《金属拉伸试验方法》, 并于 2002 年 7 月实施。新标准在强度、塑性的定义和符号、试样、试验要求及性能测定方法等方面进行了较大的修改和补充。2010 年 12 月我国重新制定了新的国家标准 GB/T 228.1—2010 《金属材料 拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法》, 代替原国家标准 GB/T 228—2002 《金属材料 室温拉伸试验方法》, 并于 2011 年 12 月实施。为了便于学习, 现将国家标准 GB/T 228.1—2010 和 GB/T 228—1987 拉伸试验性能名称、符号做一对照, 列于表 1-1 中。

表 1-1 新、旧国家标准性能名称、符号对照

GB/T 228.1—2010		GB/T 228—1987	
性能名称	符号	性能名称	符号
断面收缩率	Z	断面收缩率	ψ
断后伸长率	A $A_{11.3}$ A_{xmm}	断后伸长率	δ_5 δ_{10} δ_{xmm}
断裂总延伸率	A_t	—	—
最大力总延伸率	A_{gt}	最大力 F 的总伸长率	δ_{gt}
最大力塑性延伸率	A_g	最大力 F 的非比例伸长率	δ_g
屈服点延伸率	A_e	屈服点伸长率	δ_s
屈服强度	—	屈服点	σ_s
上屈服强度	R_{eH}	上屈服点	σ_{su}
下屈服强度	R_{eL}	下屈服点	σ_{sL}
规定塑性延伸强度	R_p 例如 $R_{p0.2}$	规定非比例伸长应力	σ_p 例如 $\sigma_{p0.2}$

续表

GB/T 228. 1—2010		GB/T 228—1987	
性能名称	符号	性能名称	符号
规定总延伸强度	R_t 例如 $R_{t0.5}$	规定总伸长应力	σ_t 例如 $\sigma_{t0.5}$
规定残余延伸强度	R_r 例如 $R_{r0.2}$	规定残余伸长应力	σ_r 例如 $\sigma_{r0.2}$
抗拉强度	R_m	抗拉强度	σ_b

第二节 硬 度

硬度是表示材料表面一个小区内抵抗弹性变形、塑性变形或破断的一种能力。测定金属材料的硬度就能够给出其软硬程度的数量概念，因此硬度也是衡量金属软硬程度的判据。实际上，硬度不是一个单纯的物理或力学量，它是代表着弹性、塑性、塑性形变强化率、强度和韧性等一系列不同的物理量组合的一种综合性能指标。

硬度试验在生产和科学研究中应用极为普遍。它之所以被广泛用来检验和评价金属材料的性能，是由其许多特点决定的。首先，硬度试验设备简单，操作迅速方便，硬度是金属力学性能中最易测量的一种性能，同时又能敏感地反映出材料的化学成分、组织结构的差异，因而被广泛用来检查热处理工艺质量或研究热处理相变过程。其次，金属的硬度与强度等力学性能指标之间虽无严格的对应关系，但可根据大量试验数据找出粗略的换算关系，从而可按硬度试验结果大体上估计金属静强度及其他性能的数值。金属的硬度与冷成形性、切削性、焊接性等工艺性能之间也存在某些联系，故可作为评定工艺性能的参考。最后，由于硬度试验一般仅在金属表面局部体积内产生很小的压痕，通常视为无损检测，因而对大多数机件可用成品进行试验而无须专门加工试样。

硬度试验方法有很多，按加载方式基本分为压入法和划痕法两大类，共十几种。通常采用压入法，即用一个硬压头（淬火钢球或金刚石锥体）以一定的压力压入被测材料表面，然后测量材料表面留下的压痕尺寸，压痕面积越大或压痕越深，材料的硬度就越低。在已经标准化的金属硬度试验方法中，按试验力状态可分为静态力硬度试验方法和动态力硬度试验方法两大类。属于静态力硬度试验方法的国家标准有：GB/T 231. 1—2009 《金属材料 布氏硬度试验 第 1 部分：试验方法》、GB/T 230. 1—2009 《金属材料 洛氏硬度试验 第 1 部分：试验方法（A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T 标尺）》、GB/T 4340. 1—2009 《金属材料 维氏硬度试验 第 1 部分：试验方法》、GB/T 18449. 1—2009 《金属材料 努氏硬度试验 第 1 部分：试验方法》。属于动态力硬度试验方法的国家标准有：GB/T 17394—2014 《金属材料 里氏硬度试验 第 1 部分：试验方法》、GB/T 4341. 1—2014 《金属肖氏硬度试验 第 1 部分：试验方法》。

一、布氏硬度

布氏硬度试验是 1900 年由瑞典工程师布利涅尔（J. B. Brinell）提出的，是目前最常用的硬度试验方法之一。

金属布氏硬度试验的原理是用直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球，以一定大小的载荷 F 压入试样表面（图 1-3（a）），经规定的保持时间后，卸除载荷，测量试样表面的压痕直径为 d （图 1-3（b）），求得压痕表面积 S ，单位压痕面积上所承受的平均压力为 F/S 。

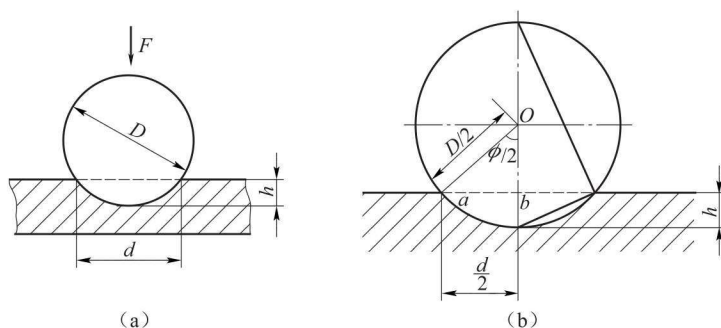


图 1-3 布氏硬度试验原理

（a）原理图；（b） h 和 d 的关系

当载荷的单位为 N 时，则：

$$HB = \frac{0.102F}{S} = \frac{0.102F}{\pi Dh} = \frac{0.102 \times 2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-2)$$

式中 HB——布氏硬度值；

F ——载荷，N；

S ——压痕面积， mm^2 ；

D ——硬质合金球直径，mm；

h ——压痕深度，mm。

式（1-2）为布氏硬度值的计算式，布氏硬度单位为 $\text{kgf}^{\text{①}}/\text{mm}^2$ ，一般不标出单位。式中的 F 、 D 已知，只有 d 是变量，因而用目测显微镜测出压痕直径 d 即可计算出硬度值 HB。实际测量时，可根据测出的 d 值从表中直接查出 HB 值。

由于压头的材料不同，因此布氏硬度用不同符号表示，以示区别。当压头为淬火钢球时，其符号为 HBS（适用于布氏硬度值在 450 以下的材料）；当压头为硬质合金球时，其符号为 HBW（适用于布氏硬度值为 450 ~ 650 的材料）。一般硬度符号 HB 前面的数值为硬度值，符号后面的数值依次表示球体直径、载荷大小及载荷保持时间（保持时间为 10 ~ 15 s 时可不标注）。例如，当用 10 mm 淬火钢球在 1 000 kgf（9 807 N）载荷作用下，保持 30 s 测得的布氏硬度为 150 时，可写成 150HBS 10/1 000/30。500HBW 5/750 表示用直径为 5 mm 的硬质合金球，在 750 kgf（7 355 N）载荷作用下保持 10 ~ 15 s，测得的布氏硬度值为 500。

在进行布氏硬度试验时，应根据被试金属材料的种类和试样厚度，选用不同大小的压头直径 D 、施加载荷 F 和载荷保持时间。按 GB/T 231.1—2009 规定，压头直径有 10 mm、5 mm、2.5 mm 和 1 mm 四种；载荷与压头直径平方的比值（ $0.102F/D^2$ ）有 30、15、10、5、2.5 和 1 六种，见表 1-2。

① 1 kgf = 9.806 65 N。