



21世纪应用型机电专业规划教材

JINSHU GONGYIXUE

金属工艺学

(热加工分册) ■ 张玉贤 主编

JINSHU GONGYIXUE



中国计量出版社
CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE



21 世纪应用型机电专业规划教材

金属工艺学

(热加工分册)

张玉贤 主编

中國科學院
出版



中国计量出版社

游踪歷歷於本三衛，願同觀覽樂明時

图书在版编目 (CIP) 数据

金属工艺学 (热加工分册). /张玉贤主编. —北京: 中国计量出版社, 2007. 8

(21 世纪应用型机电专业规划教材)

ISBN 978-7-5026-2642-6

I. 金… II. 张… III. 金属加工—工艺学—教材 IV. TG

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 062811 号

内 容 提 要

本书共十四章, 其主要内容包括: 金属的机械性能及其实验方法, 金属的晶体结构与结晶, 合金的结构与二元合金状态图, 铁碳合金相图, 钢的热处理, 合金钢, 粉末冶金与硬质合金简介, 砂型制造, 铸铁及其熔化, 钢和有色合金的铸造, 铸件的清理、缺陷和检验, 特种铸造, 铸件结构的工艺性, 焊接生产等。章后附有适量的思考题与习题。

本书注重理论知识的同时, 将实习与实验内容合并在一起, 内容精炼、重点突出, 取材新颖, 对传统的教学内容进行了必要的调整和增删。

本书可作为高等院校、高职高专机械类专业以及相关专业的教材, 亦可作为金属加工岗位人员的培训用书。

中国计量出版社 出版

地 址 北京和平里西街甲 2 号 (邮编 100013)

电 话 (010) 64275360

网 址 <http://www.zgjl.com.cn>

发 行 新华书店北京发行所

印 刷 北京市媛明印刷厂印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 15.5

字 数 365 千字

版 次 2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

印 数 1—3 000

定 价 28.00 元

如有印装质量问题, 请与本社联系调换

版权所有 侵权必究

教材编委会

主任 魏天路

副主任 王 琳

委员 赵玉冰 李亚芹 董晓威 王艳凤

李春玉 于淑芳 张玉贤 李清晨

李 伟 潘 锲 黄 燕 张耀宇

孙红旗 刘力强 张洪霞 陈 振

刘明亮 刘建军 李宪芝 朱向东

杨 海 刘新柱 陈永波 杨 康

张连军 霍北仓 李 东 战丽红

阮世鑫 吴云花 张燕梁 陈 兴

王 颖 王 琳

— 本 书 编 委 会 —

主 编 张玉贤

敬天慧 丑 主

副主编 李清晨 霍北仓 张燕梁 李 伟

李春玉 李 东 战丽红 阮世鑫

刘建军 黄 爽 雷 冲 李

魏 莉 曹 燕 李 燕 代 侯 戴 玲 侯

参 编 陈 兴 王 颖 王 琳

崔 琳 戴 永 莉 孙 博 侯 燕 琳

玲 丽 燕 李 合 非 雪 军 彭 燕

兴 莉 梁 燕 燕 苏 云 吴 鑫 世 闻

梅 王 琳 王

编写说明

本系列教材是根据 21 世纪对机电专业人才知识、能力、素质培养的需要和新的机电基础教学体系的要求，以综合设计能力、测试分析能力、创新意识和动手能力培养为主线，与理论教学和机电基础综合课程设计实践相互联系、互为依托又独立设课的机电系列教材。

机电一体化技术是计算机、光电子、机械、液压等相结合的综合科学，能将这些技术有机地结合正是本专业的优势所在，自动化生产线、加工中心、数控机床等是机电一体化技术的产物。

按照人事部最新统计预测，“机电一体化”专业技术人才是我国教育市场今后几年急需紧缺的八大最热门专业人才之一；21 世纪内中国将发展成为世界现代制造业加工中心，“机电一体化”技术就是加工制造业为了适应现代生产环境及市场的动态变化，将微电子技术、计算机技术、信息技术、自动控制技术综合应用于制造加工生产全过程的一批高新复合技术群，已形成“机、电、计算机”三分天下的实际格局，是 21 世纪国民经济发展所急需的优势学科方向；是我国开发大西北和振兴东北老工业基地的重大战略决策的重要科技支撑；21 世纪中国将需要一大批掌握先进控制技术，能从事数控机床、加工中心、智能机器人以及其他新型机电一体化技术和产品的设计、安装、调试、操纵、编程与开发的高级复合应用素质型创新技术人才。

从机电技术的发展现状中，我们可以看出目前的机电专业呈现出两大特点：首先是机电专业的技术知识发展迅速。由于激光技术、模糊技术和信息技术的融入，使机电专业的知识领域向周围各领域扩展，形成许多新的边缘科学知识。其次是对专业技术能力的要求不断提高。机电设备的智能化、微型化，要求所有的工作人员从设备机械设计、生产到调试、维

修，都具备较高的技能操作水平，才能够胜任工作。

机电专业在坚持专业数量和质量同步发展的同时，也应注重专业人才培养质量的提高，形成创新专业、特色专业、精品专业，适应区域经济和社会发展的需求。在专业建设时，要形成专业群，做到资源的合理配置与优化，逐步完成相应的课程建设。

加强实践教学环节的建设。在实践环节的硬件建设上，保证每一个专业有设备技术先进的实训基地，在校外有稳定的实习基地；在实践环节的软件建设上，建立完善的实践教学管理制度，提升专业教师双师型教师比重，建设一支富有实践经验的指导教师队伍。

优化课程体系。从培养学生的技术应用能力、自我学习能力和实践能力出发，贯彻现代教育思想，遵循理论为技术应用服务的原则，突出专业教育特点，进行有效的课程整合，创新教材建设。教材建设要根据专业人才培养的要求，择用已出版的优秀教材；对于没有合适教材的课程，结合实践教学的条件积极自编、组编、自用专业课程教材。以适应专业课教学模式，由现在的理论教学型向边教学、边实践工学结合型的施教模式转化。

根据上述指导思想，我们组织编写了本系列教材。教材编写过程中，得到了各院校领导及一线教师的大力支持，在此一并表示感谢。

由于稿件编写时间有限，以及编者对知识的掌握程度有限，所以，书中难免有所疏漏，敬请广大教师、学生和读者给予批评指正。

教材编委会

2007年7月

前言

• FOREWORD •

本书是根据教育部面向 21 世纪“工程制图与机械基础系列课程教学内容和课程体系改革的研究与实践”研究项目中应达到的教学基本要求编写的。

本书内容共分十四章，包括金属的机械性能及其实验方法，金属的晶体结构与结晶，合金的结构与二元合金状态图，铁碳合金相图，钢的热处理，合金钢，粉末冶金与硬质合金简介，砂型制造，铸铁及其熔炼，钢和有色合金的铸造，铸件的清理、缺陷和检验，特种铸造，铸件结构的工艺性，焊接生产等。带 * 号为选学内容，根据不同专业取舍，章后附有适量的复习思考题。

本书编写特点如下：

1. 根据本课程实践性很强的特点，本书注重理论知识的同时将实习与实验内容合并在一起，内容体系不同于以前的同类教材，本教材可以在课堂上讲授也可以在实践中指导。

2. 紧密结合教学基本要求，教材内容精炼、重点突出，取材力求更新，对传统的教学内容进行了必要的调整和增删。

3. 侧重应用理论和应用技术，强调知识的应用性、针对性。

4. 介绍了金属加工的新技术、新工艺及发展趋势。

本书可作为高等院校、高等专科学校、高等职业学院、成人教育学院机械类专业教材，亦可作为开设本课程的其他专业的选用教材，还可供电大、职大、函大等同类专业选用教材。此外，也可作为相关教学改革试点专业的参考书。

本书由黑龙江农垦农业职业技术学院张玉贤副教授担任主编及全书的统稿工作，参加编写的有（按编写顺序）黑龙江农垦农业职业技术学院张玉贤（绪论、

第一章、第二章、第三章)、佳木斯大学李清晨老师(第四章、第五章、第六章)、佳木斯大学李伟老师(第七章、第十四章)、黑龙江八一农垦大学张燕梁老师(第八章、第十章)、黑龙江农垦农业职业技术学院霍北仓老师(第九章)、浙江林学院刘建军老师(第十一章)、长春职业学院李春玉老师(第十二章)、黑龙江农垦农业职业技术学院李冬、战丽红、阮世鑫(共同编写第十三章),本书统稿过程中对图像的处理工作由陈兴、王颖、王琳三位老师负责。

在整个编写过程中,我们参阅了各种版本的同类教材及有关资料、技术标准等,在此恕不一一列举,谨致以衷心的感谢。

由于编者水平有限且时间仓促,书中不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

2007年7月

目 录

• CONTENTS •

绪论	(1)
第一章 金属的机械性能及其实验方法	(2)
第一节 金属材料的主要性能	(2)
第二节 金属的工艺性能	(7)
思考题与习题	(9)
第二章 金属的晶体结构与结晶	(10)
第一节 金属材料的结构	(10)
第二节 金属的结晶	(13)
思考题与习题	(15)
第三章 合金的结构与二元合金状态图	(16)
第一节 合金结构	(16)
第二节 合金相图	(18)
思考题与习题	(19)
第四章 铁碳合金相图	(20)
第一节 铁碳合金的基本组织	(20)
第二节 铁碳合金相图	(22)
第三节 碳素钢	(30)
思考题与习题	(32)
第五章 钢的热处理	(33)
第一节 钢在加热时的转变	(33)
第二节 过冷奥氏体转变产物的组织形态与性能	(37)
第三节 过冷奥氏体转变图	(40)

第四节	钢的退火和正火	(45)
第五节	钢的淬火	(48)
第六节	钢的淬透性	(53)
第七节	钢的回火	(57)
第八节	钢的表面热处理	(60)
第九节	热处理新技术简介	(66)
思考题与习题		(68)
第六章	合金钢	(70)
第一节	合金元素在钢中的作用	(70)
第二节	合金元素对钢的热处理的影响	(73)
第三节	合金钢的分类与牌号	(76)
第四节	低合金结构钢与合金结构钢	(78)
第五节	合金弹簧钢与滚动轴承钢	(80)
第六节	合金工具钢与高速工具钢	(82)
第七节	特殊性能钢	(86)
思考题与习题		(88)
[实验] 合金钢及铸铁显微组织的观察		(89)
第七章	粉末冶金与硬质合金简介	(94)
思考题与习题		(96)
第八章	砂型制造	(97)
第一节	造型制芯	(98)
第二节	造型材料	(109)
第三节	浇注系统和冒口	(116)
第四节	铸造工艺图和模型	(127)
思考题与习题		(133)
第九章	铸铁及其熔化	(134)
第一节	铸铁的基本概念	(134)
第二节	普通灰口铸铁的生产	(139)
第三节	可锻铸铁的生产	(141)
第四节	球墨铸铁的生产	(143)
第五节	耐磨铸铁	(148)
第六节	铸铁的熔化和浇注	(149)
思考题与习题		(156)
*第十章	钢和有色合金的铸造	(157)
第一节	铸 钢	(157)

第二节	铸造铝合金	(159)
第三节	铸造铜合金	(162)
思考题与习题		(166)
第十一章	铸件的清理、缺陷和检验	(167)
第一节	铸件的落砂和清理	(167)
第二节	铸件的缺陷及其修补	(168)
第三节	铸件质量检验	(169)
思考题与习题		(171)
第十二章	特种铸造	(172)
第一节	金属型铸造	(172)
第二节	压力铸造	(174)
第三节	低压铸造	(175)
第四节	离心铸造	(176)
第五节	熔模铸造	(177)
第六节	磁型铸造	(178)
第七节	陶瓷型铸造	(179)
思考题与习题		(180)
第十三章	铸件结构的工艺性	(181)
第一节	合金铸造性能对铸件结构的要求	(181)
第二节	造型工艺对铸件结构的要求	(185)
第三节	铸造方法对铸件结构的要求	(189)
思考题与习题		(191)
第十四章	焊接生产	(192)
第一节	手工电弧焊	(193)
第二节	气焊与气割	(209)
第三节	其他焊接方法	(218)
第四节	常用金属材料的焊接	(224)
第五节	焊接应力和焊缝质量检验	(227)
思考题与习题		(232)
参考文献		(234)

绪 论

本课程是研究金属材料及其加工工艺的一门学科。它是机械类专业一门重要的专业基础课。包括基础理论、金属材料、加工工艺等。

矿石可以制成机械产品,这需要一系列的加工过程,矿石冶炼成铸锭,再通过铸造、压力加工或焊接制成毛坯,然后进行切削加工制成各种零件,再选择适当的热处理装配成产品。选择的材料不同加工工艺也不同,产品的质量、成本也会受到影响。机械技术人员必须具有能全面地、综合地掌握从选材到各种加工工艺的基础知识,金属工艺学就是培养学生获得这些知识的一门技术基础课。

从实践中发展起来的金属工艺学对人类文明的进步起了推动作用。商代就有精美的铜器,春秋时期铸成的铁器已用于农耕,战国时期已有名剑“干将”、“莫邪”,唐代开始锡焊、银焊,明朝出现了切削工具,宋应星编写的世界上最早的金属工艺科技文献《天工开物》记载了冶铁、炼钢、铸造、锻造、淬火等加工方法。我国古代在金属工艺学方面的光辉历史,对世界文明和社会进步有举世公认的卓越贡献。

新中国成立以来,金属工艺学的发展更是突飞猛进。钢产量居世界前列,有色金属的生产和加工技术也有了大幅度的提高,研究出具有世界先进水平的稀土镁球墨铸铁、特殊性能合金等新材料,北京亚运村高层建筑和大型体育场馆的建设,是我国建筑技术、建筑材料和大跨度金属结构建筑高水平发展的标志。“一箭多星”的卫星成功发射和核潜艇的问世等举世瞩目的成就都体现了金属材料及加工工艺的作用。

金属工艺学是一门实践性很强的技术学科。学习本课程应具有一定的感性知识,应配有金工实习,以使學生具有一定的操作技能。搞好实践性教学环节,是学好本课程的重要条件,因此,本书也编入了一些实践性教学内容。

通过本课程的学习,应达到如下基本要求:

- (1) 熟悉常用金属材料的组织、性能和应用;
- (2) 熟悉常用金属材料的热处理技术;
- (3) 熟悉常用金属材料的加工工艺。

本课程的学习内容强调理论联系实际,注重应用理论和实践技术,注重各种能力的培养。带*号的为选学内容,可根据不同专业做取舍,章后附有适量的习题与思考题,是巩固、复习所学知识的手段,应充分重视。



第一章 金属的机械性能及其实验方法

第一节 金属材料的主要性能

金属材料的性能直接关系到金属零件或金属制品的质量、使用寿命和加工成本，是产品选材及拟订加工工艺方案的重要依据。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，包括力学性能、物理性能、化学性能。

工艺性能是指金属材料在加工过程中所表现出来的性能，包括铸造性能、焊接性能、锻造性能、热处理性能和切削加工性能等。

金属材料作为结构材料使用时，选材的依据主要是力学性能指标。力学性能又称为机械性能，是指金属材料在外力作用下所表现出的抵抗变形和破坏的能力。常用的力学性能有强度、塑性、硬度、冲击韧性和疲劳强度等。

一、强度

金属材料在外力作用下抵抗永久变形和断裂的能力，称为强度。按载荷作用方式不同，强度可分为抗拉强度、抗弯强度、抗压强度和抗剪强度等。通常以抗拉强度为强度指标。金属材料的抗拉强度以标准试样在万能材料试验机上进行拉伸试验测定。

图 1-1 为拉伸标准试样，分为长试样 ($l_0=10d_0$) 和短试样 ($l_0=5d_0$) 两种。 l_0 和 d_0 值有规定的标准值，一般 l_0 为 100 mm 或 50 mm。

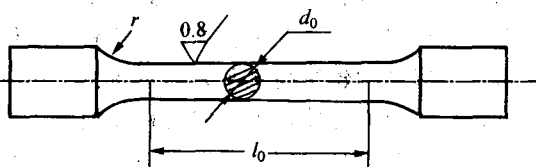


图 1-1 拉伸标准试样

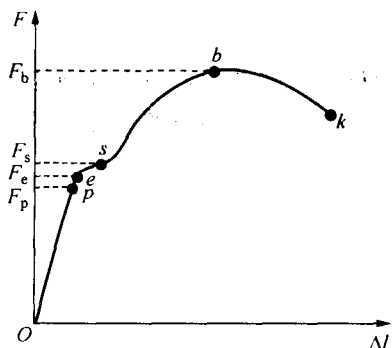


图 1-2 低碳钢 (退火状态) 的力—伸长曲线

试验时，标准试样装夹在万能材料试验机上，缓慢加载拉伸。随着载荷增加，试样逐渐伸长，直至试样拉断。载荷 (F) 与相应的试样伸长量 (Δl) 可绘成拉伸曲线图。

图 1-2 为低碳钢 (退火状态) 的力—伸长曲线。由图可知，当 $F=0$ 时， $\Delta l=0$ ，载荷增大到 F_p 时， Δl 也成比例增加。在此范围内卸除载荷，试样能完全恢复到原来的形状和尺寸，试样处于弹性变形阶段。当 F 超过 F_e 时，试样不再成比例伸长，卸载后试样不能完全恢复到原来的形状和尺寸，此时试样出现塑性变形 (永久变形)。载

荷增至 F_s , 曲线出现水平或锯齿形线段, 表示不再增加承载而试样继续伸长, 这种现象称为“屈服”。载荷超过 F_s , 试样随载荷增加而继续伸长, 此时试样已产生较大的塑性变形, 当载荷增至最大值 F_b 时, 试样伸长量迅速增大而截面迅速减小, 形成“缩颈”。由于缩颈处截面的急剧缩小, 单位面积承载大大增加, 最后到 k 点试样断裂。

金属材料受外力作用时, 其内部产生与外力相抗衡的内部抗力, 称为“内力”。单位面积上的内力称为“应力”, 用 σ 表示。金属材料的强度指标就是用应力来度量的。常用的强度指标有弹性极限 σ_e 、屈服点 σ_s 和抗拉强度 σ_b 等。

金属材料产生按比例是完全弹性变形所能承受的最大应力值称比例极限 σ_p 。但比例极限不易精确测定, 通常用开始产生微量塑性变形时的最大应力值 σ_p 作为完全弹性变形的强度指标, 称弹性极限。

弹性极限 $\sigma_e = F_e / S_0$ (MPa)。式中, F_e 为弹性变形时的最大载荷 (N); S_0 为试样原始横截面面积 (mm^2)。

试样在试验过程中, 力不增加 (保持恒定), 但仍能继续伸长时的应力值称屈服点 σ_s 。有些金属材料的屈服现象不明显, 如铸铁、高碳钢等, 测定很困难。因此, 国家标准规定此类材料, 以产生 0.2% 塑性形变量时的应力值定为屈服点, 用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

屈服点 $\sigma_s = F_s / S_0$ (MPa)。式中, F_s 为材料屈服时的最小载荷 (N); S_0 为原始横截面面积 (mm^2)。

试样拉断前所能承受的最大应力值称抗拉强度 σ_b , $\sigma_b = F_b / S_0$ (MPa)。式中, F_b 为断裂前的最大载荷 (N); S_0 为原始横截面面积 (mm^2)。

金属零件和结构在工作中一般不允许产生塑性变形, 所以设计零件、结构时, 屈服点 σ_s 是重要设计依据。抗拉强度 σ_b 表示材料抵抗塑性变形和破坏的最大能力, 测试数据较准确, 因此, 有关手册和资料往往提供的设计、选材的强度指标是抗拉强度 σ_b 。

二、塑性

塑性是指断裂前材料发生永久变形的能力。常用的塑性指标有断后伸长率 δ 和断面收缩率 ψ , 一般通过拉伸试验来测定。

断后伸长率 δ 又称延伸率, 是试样被拉断时, 标距长度的伸长量 Δl 与原始标距 l_0 的百分比, 即 $\delta = (\Delta l / l_0) \times 100\%$ 。

由于标准试样有长、短和定标距之分, 所以同一材料用不同标准试样测定会有不同值; 而不同材料进行比较时, 必须是相同标准试样测定的数值才有意义。

断面收缩率为试样被拉断时, 缩颈处横截面的最大缩减量 ΔS 与原始横截面面积的百分比, 即 $\psi = (\Delta S / S_0) \times 100\%$ 。

断面收缩率不受试样尺寸影响, 能较好地反映材料的塑性。

断后伸长率和断面收缩率的数值大, 表示金属材料的塑性变形能力大, 塑性好。当机械零件工作时因负荷过大而破坏时, 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。有些脆性材料如铸铁、陶瓷等, 塑性极低, 拉伸时几乎不产生明显的塑性变形, 超载时会突然断裂, 应用时必须注意。



三、硬度

硬度是指材料抵抗局部变形或划痕的能力。

测定硬度的方法很多，最常用的是压入法。硬度测定的设备较简单，操作方便，不需做专门的试样，可以在工件上直接测定而不损坏工件，是生产工作中广泛应用的力学性能指标。常用的硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等几种。

1. 布氏硬度 HB

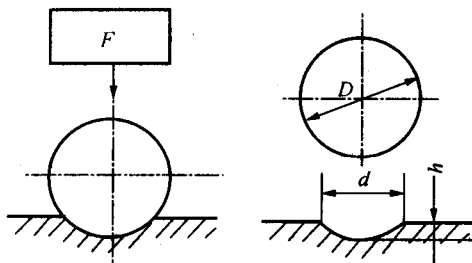


图 1—3 布氏硬度测试原理

布氏硬度测试原理如图 1—3 所示。压头为淬火钢球或硬质合金球，在布氏硬度计上压头以规定的试验力和时间压入被测金属表面，卸除载荷后计算金属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 HB。

$$HB = \frac{F}{S_H}$$

式中， F 为试验力，单位为 $\text{kgf}^\text{①}$ ； S_H 为压痕表面面积 (mm^2)； h 为压痕深度 (mm)； D 为压头直径 (mm)。压痕深度 h 不易测量，在实际测定时，一般并不进行计算，而是用放大镜检查出压痕直径后，查表即可直接读出 HB 值（见表 1—1）。

表 1—1 压痕直径与布氏硬度对照表（部分）

压痕直径 d/mm	HBS 或 HBW $D=10\text{ mm}$ $F=29.42\text{ kN}$	压痕直径 d/mm	HBS 或 HBW $D=10\text{ mm}$ $F=29.42\text{ kN}$	压痕直径 d/mm	HBS 或 HBW $D=10\text{ mm}$ $F=29.42\text{ kN}$
2.40	653	3.02	409	3.64	278
2.42	643	3.04	404	3.66	275
2.44	632	3.06	398	3.68	272
2.46	621	3.08	393	3.70	269
2.48	611	3.10	388	3.72	266
2.50	601	3.12	383	3.74	263
2.52	592	3.14	378	3.76	260
2.54	582	3.16	373	3.78	251
2.56	573	3.18	368	3.80	255

① $1\text{ kgf}=9.81\text{ N}$ 。

由于金属材料表面硬度不同,工件大小厚薄也不同,只用一种压力和压头,会影响硬度测定。因此,GB 231—1984《金属布氏硬度试验方法》规定,有7种 F/D^2 的比值,可选用不同的压力和压头。通常用淬火钢球压头测定的布氏硬度值用 HBS 表示;用硬质合金球压头测定的布氏硬度值用 HBW 表示。符号后面的数字依次表示压头球体直径 D 、试验力 F 和试验力保持时间 t (当为 10~15 s 时不标注)。一般材料布氏硬度值小于 450 时宜用 HBS,布氏硬度值在 450~650 之间时宜用 HBW。例如,170 HBS10/1000/30 表示用直径 10 mm 的钢球,在 9807 N 的试验力作用下,保持 30 s 时测得的布氏硬度值为 170。530HBW5/750 表示用直径 5 mm 的硬质合金球,在 7355 N 的试验力作用下,保持 10~15 s 时测得的布氏硬度值为 530。硬度高的材料、薄壁工件和表面要求高的工件,不宜用布氏硬度测定。通常布氏硬度测定适用于有色金属、低碳钢、灰铸铁和退火、正火、调质处理的中碳结构钢。

表 1—2 为不同金属材料根据硬度选用的 F/D^2 值。

表 1—2 按材料和布氏硬度选择 F/D^2 值

材料	布氏硬度值	F/D^2
钢和铸铁	<140	10
	≥ 140	30
铜及其合金	<35	5
	35~130	10
	>130	30
轻金属及其合金	<35	2.5 (1.25)
	35~80	10 (5 : 15)
	>80	10
铅、锡		1.25 (1)

注: ①应尽量选用 $\phi 10$ mm 球压头;
②应尽量选用无括号的 F/D^2 值。

2. 洛氏硬度 HR

洛氏硬度原理如图 1—4 所示。洛氏硬度也是用压入法测定的,但不是测量压痕面积,而是通过测量压痕深度大小来衡量材料硬度高低。硬度高的材料压入深度小,直接以深度来表示硬度值与习惯认识的硬度高低不一致,因此,实际使用的硬度值是用一常数 K 减去测定的深度值,数值大表示硬度高。

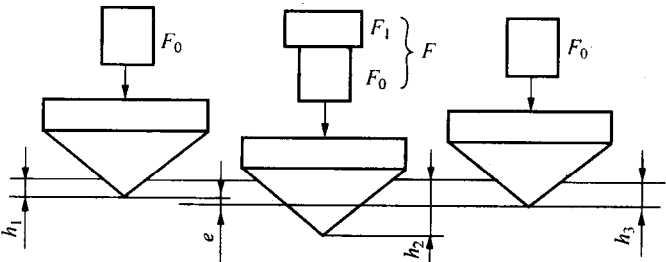


图 1—4 洛氏硬度原理示意图