

河南省高等职业教育规划教材

工程材料与 成型加工

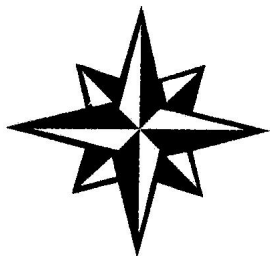
主编 薛培军

河南大学出版社

河南省高等职业教育规划教材

工程材料与成型加工

主 编 薛培军



河南大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程材料与成型加工/主编薛培军. —开封: 河南大学出版社, 2004. 2
河南省高等职业教育规划教材
ISBN 7-81091-118-X

I. 工… II. ①薛… III. 工程材料-成型-高等学校: 技术学校-教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 073649 号

书 名: 工程材料与成型加工
主 编: 薛培军

策 划: 朱建伟 史锡平

责任编辑: 刘 云

责任校对: 史 红

责任印制: 苗 卉

封面设计: 张 伟

版式设计: 苗 卉

出 版 河南大学出版社

地址: 河南省开封市明伦街 85 号 邮编: 475001

电话: 0378-2864669 (事业部) 0378-2825001 (营销部)

网址: www.hupress.com E-mail: bangong@hupress.com

经 销 河南省新华书店

排 版 河南大学出版社印务公司

印 刷 河南省诚和印刷有限公司

版 次 2004 年 2 月第 1 版 印 次 2004 年 2 月第 1 次印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16 印 张 26.5

字 数 630 千字 印 数 1—1 500 册

ISBN 7-81091-118-X/T·51

定 价: 37.60 元

(本书如有印装质量问题请与河南大学出版社营销部联系调换)

河南省高等职业教育规划教材编写委员会

主任：赵金昭

副主任：习 谏 拜五四 王志勤 苏万益

委员：吴少珉 李兴亚 王伟民 薛培军
李 光 孙保平 孙五继 董奇志
时庆云 张新艳 陈 军 菅国坤
杜建根 吴勇军 陶 昆 陈家友
王朝庄 张衍昶 李玉成 董浩平
庞进生

《工程材料与成型加工》作者名单

主 编：薛培军

副主编：刘东慧 张曙灵

参编人员：（以姓氏笔画为序）

刘东慧 孙海燕 陈桂芳 张曙灵

范 敏 贺书乾 薛培军

经河南省教育厅批准，由河南省高等职业教育研究会组织编写的河南省高等职业教育规划教材，就要付梓出版了。这是我省高教事业改革发展的一项重要成果，确实值得庆贺。

大力发展教育和科学事业，培养和造就数以亿计的高素质劳动者、数以千万计的专门人才和一大批拔尖创新人才，是党的十六大明确提出的新时期教育的任务。高等职业教育，作为高等教育的一种类型，其培养的是拥护党的基本路线，适应生产、建设、管理、服务第一线需要，德、智、体、美等方面全面发展的高等技术应用型专门人才。因而，是我国全面建设小康社会的一支重要力量。就其本质属性来说，高等职业教育具有鲜明的职业特征，这就要求我们在人才培养工作中，不能沿袭学科型教材，而是编写、出版和使用技术型教材，即要研究和改革高等职业教育的课程教学内容和教学方法，编写和出版体现高等职业教育规律和特点的优质教材，力求体现全面建设小康社会对高等技术应用型人才培养提出的新要求。从这个意义上讲，河南省高等职业教育规划教材的编写出版，不仅非常必要，而且十分及时，它顺应了我国政治、经济、文化、科技发展的新形势，适应了高等教育尤其是高职高专教育改革发展的新趋势，对我省高职高专教育水平的提高将产生深远而积极的影响。

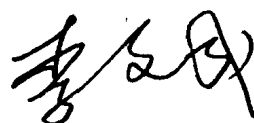
河南省高等职业教育研究会，作为省一级教育学会，在以赵金昭同志为会长的学会班子的组织和带领下，自2000年始，一直致力于高等职业教育理论与实践的研究工作，以专业建设为龙头，以教材建设为核心，以人才培养模式的建构为出发点，与时俱进，开拓创新，组织全省高职高专院校高水平的专家，研究并取得了一大批源自实践、富有特色、十分鲜活的教改成果。高等职业教育规划教材的编写、出版，正是这些研究成果的积淀和升华。

与全国其他同类教材相比，首批推出的计算机应用与维护、秘书、机电一体化等专业规划教材，有3个方面的显著特色：其一，适用性。教材编写人员，均是从事高职高专教育教学第一线的专家，全国知名的教授不乏其人。因此，规划教材体现了高职教育的特色，从而使教材的针对性和适应性得到完美的统一。其二，应用性。首批推出的高等职业教育规划教材有一个最显著的特色，就是强化和突出了应用性特征，每个专业的核心课程均配套编写了实训教材，如计算机应用与维护专业的《C语言程序设计实训》、秘书专业的《秘书实训》，机电一体化专业的《计算机工程制图实训教程》等，均将学生的实践能力培养纳入了教材建设体系。其三，新颖性。规划教材在内容的取舍上，遵循“基础理论必需、够用为度”的原则，适当精简验证性的原理阐述，大量充实新技术、新内容，及时反映本学科领域的最新科技成果，广泛吸收先进的教学经验，积极整合优秀教学成果，给人耳目一新的感觉。此外，在编写体例上，重视图表的运用，并在每章

之后安排了思考题、实训题等供学习者练习，体现出编著者以人为本、注重技术应用能力培养的教育思想。

高等职业教育教材建设是一项十分重要的工作。因为，教材的基本作用，就是集人类先进的科学文化成果，传递给下一代，培养后继创新人才。优质的特色教材，在本质上是学校水平的体现。我们在肯定已编写的高等职业教育教材所取得成绩的同时，还要认识到我们在这方面改革探索的实践还不很充分，还需要继续进行广泛、扎实、深入的研究。并随着教育教学改革的深化，对出版的教材进行必要的充实、修改，使之日臻完善。

我相信，经过3~5年的努力，随着规划教材的陆续问世，随着系列规划教材在教育教学中的广泛使用，我们一定会迎来高等职业教育事业繁荣发展的新局面。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '李彦彦' (Li Yanyan).

2003年8月20日

前 言

本书是河南省高等职业教育研究会根据河南省教育厅的要求，组织编写的“河南省高等职业教育规划教材”之一。

高等职业技术是我国目前实行的一种新的高等教育类型。针对高等职业技术教育的特点，更好地培养符合生产岗位要求的应用型专门人才，河南省教育厅组织编写了“河南省高等职业教育规划教材”，旨在突出特点、符合实际、重在应用，真正培养出生产、管理、建设、服务第一线的高等技术应用型人才。本书即为其中的一本，是为机电类专业开设的一门主干技术基础课。

本书在编写时做了如下考虑：在保证学生掌握基本知识、基本理论、基本技能的前提下，教材内容适当降低重心，不强调整理论分析和公式推导，注重工程实际应用，以期培养学生解决实际问题的能力适应现代科学技术发展的需要，扩大学生的视野，在力求精练的原则下；适当拓展了教材的内容，如非金属材料的成型等。同时，在有关章节中介绍了一些新材料、新工艺和新技术。在课程体系上，全书以材料、成型加工为主线分为了16章，突出了材料选用、毛坯制作、零件加工成型等内容；每章后配有习题，以便于学生巩固所学知识。本书尽可能地采用了新颁布的有关国家标准、规范等。本书可作为高等职业技术学院机电专业教材，也可适用于近机类、非机类专业。教学参考学时80~100学时。

参加本书编写工作的有：中州大学薛培军（绪论、第7章、第8章、第9章），贺书乾（第1章、第2章、第15章）；平原大学刘东慧（第3章、第4章4.1节）；焦作大学张曙灵（第4章4.2节、第5章、第6章）；洛阳大学范敏（第10章、第16章）；三门峡职业技术学院陈桂芳（第11章、第13章、第14章）；济源职业技术学院孙海燕（第12章）。全书由薛培军担任主编，刘东慧、张曙灵担任副主编。

本教材由清华大学王先逵教授，焦作工学院赵俊伟教授、武良臣教授审阅，并提出宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不当之处，恳请读者和专家批评指正。

编者

2003年8月

.....	(1)
.....	(3)
1.1 材料的静态力学性能	(3)
1.2 材料的动态力学性能	(8)
1.3 材料的断裂韧性	(10)
1.4 材料的高温力学性能	(11)
思考与练习题	(11)
.....	(13)
2.1 材料的结构	(13)
2.2 纯金属的结晶	(24)
2.3 材料的同素异构与同分异构	(27)
思考与练习题	(28)
.....	(30)
3.1 二元合金相图	(30)
3.2 铁碳合金相图	(36)
思考与练习题	(47)
.....	(49)
4.1 钢和铸铁	(49)
4.2 非铁金属及其合金	(96)
思考与练习题	(112)
.....	(113)
5.1 高分子材料	(113)
5.2 陶瓷材料	(119)
5.3 复合材料	(125)
5.4 磁性材料	(127)
5.5 新型材料简介	(129)
思考与练习题	(131)
.....	(132)
6.1 热处理的分类	(132)
6.2 钢在加热和冷却时的组织转变	(134)
6.3 钢的热处理工艺	(140)
6.4 铸铁的热处理	(153)

6.5	非铁金属的时效强化	(158)
6.6	高聚物的改性强化	(160)
6.7	材料的复合强化	(162)
6.8	材料的表面处理	(163)
	思考与练习题	(166)
第7章 铸造		(167)
7.1	砂型铸造	(167)
7.2	铸造工艺图	(175)
7.3	合金的铸造性能	(178)
7.4	铸件的结构设计	(185)
7.5	特种铸造	(189)
	思考与练习题	(194)
第8章 压力加工		(196)
8.1	金属的塑性变形	(196)
8.2	锻造加工	(198)
8.3	板料冲压	(210)
	思考与练习题	(217)
第9章 焊接与胶接		(219)
9.1	熔焊	(219)
9.2	压焊与钎焊	(234)
9.3	常用金属材料的焊接	(239)
9.4	焊接结构设计	(245)
9.5	胶接	(248)
	思考与练习题	(252)
第10章 金属切削加工基础		(253)
10.1	切削加工的运动分析及切削要素	(253)
10.2	金属切削刀具	(254)
10.3	金属切削过程	(257)
10.4	提高切削加工质量的途径	(261)
10.5	材料的切削加工性	(262)
	思考与练习题	(263)
第11章 金属切削机床		(264)
11.1	金属切削机床基本知识	(264)
11.2	车床	(268)
11.3	磨床	(275)
11.4	齿轮加工机床	(276)
11.5	数控机床	(279)

11.6 其他机床	(282)
思考与练习题	(284)
第 12 章 典型表面加工	(285)
12.1 外圆表面加工	(285)
12.2 孔加工	(295)
12.3 平面加工	(310)
12.4 螺纹加工	(315)
12.5 齿轮加工	(318)
思考与练习题	(325)
第 13 章 机械加工工艺规程	(326)
13.1 机械加工工艺过程概述	(326)
13.2 机械加工工艺规程的制定	(329)
13.3 零件的工艺性分析及毛坯的选择	(332)
13.4 工件的安装与基准	(334)
13.5 机械加工工艺路线的拟定	(336)
13.6 工序设计	(343)
13.7 机械加工的生产率与经济性分析	(350)
思考与练习题	(354)
第 14 章 特种加工	(356)
14.1 概论	(356)
14.2 电火花加工	(358)
14.3 电火花线切割加工	(360)
14.4 电化学加工	(362)
14.5 激光加工	(365)
14.6 电子束和离子束加工	(367)
14.7 超声加工	(368)
14.8 其他特种加工	(370)
思考与练习题	(373)
第 15 章 非金属材料加工成型	(374)
15.1 塑料的加工成型	(374)
15.2 橡胶的加工成型	(380)
15.3 陶瓷的加工成型	(381)
15.4 复合材料的加工成型	(382)
思考与练习题	(384)
第 16 章 典型零件的选材	(385)
16.1 机械零件的失效	(385)
16.2 机械零件材料选择的一般原则	(388)

16.3 典型零件选材及工艺路线	(391)
思考与练习题	(395)
.....	(396)
附录A 布氏硬度换算表	(396)
附录B 黑色金属硬度及强度换算表 (GB 1172—74)	(402)
附录C 国内外常用钢钢号对照表	(407)
附录D 国内部分铝及其合金牌号对照表	(410)
.....	(412)



绪 论

《工程材料与成型加工》是一门研究工业生产中常用的机械零件的制造方法（包括材料选择、毛坯制造、零件加工成型等）的综合性技术基础课。

工程材料分为金属材料和非金属材料两大类。常用的金属材料有黑色金属、有色金属及其合金、粉末合金；常用的非金属材料有高分子材料、陶瓷材料和复合材料。工程材料品种复杂、性能各异，为了合理地选用材料，必须研究材料的结构、组织与性能及其相互间的关系，以充分发挥材料的潜力，提高材料的性能，降低零件的成本，提高产品的质量。随着科学技术的发展，把金属材料体系和非金属材料体系有机地结合起来是一大发展趋势，目前已成为一种新兴的产业，并且正在以较快的速度开拓和发展。所谓新型材料，就是指那些新近发展或正在发展的、具有优异性能或特殊性能的材料，其中包括金属、有机合成及无机非金属材料等。从用途和性质上又可分为结构材料和功能材料。不过新型材料和常规材料并没有明显的界限，而且，掌握好常规材料的基本理论和性能是基础，同时，注意新型材料的发展趋势也是必要的。

现代科学技术的发展，也大大推动了机械加工技术的进步。本书除传统的铸造、压力加工、焊接、机械切削加工和非金属成型的理论知识和加工工艺外，还介绍了采用机械技术和电子技术相结合的新的加工方法，从而拓宽了工艺知识面，更适合于现代工业生产的需要。

工程材料与成型加工技术，广泛应用于国防工业、机械制造业、建筑业及电子技术、食品化工等部门。本课程的主要任务包括：

(1) 熟悉常用工程材料的组织、性能、应用和选用原则。

(2) 掌握各种主要加工方法的基本原理和工艺特点，初步具有正确选择毛坯、零件加工方法以及工艺分析的能力。

(3) 熟悉零件结构设计的工艺性要求。

(4) 了解各种主要的加工方法和常用设备的基本工作原理。

(5) 初步了解有关新材料、新工艺、新技术。

本课程是一门实践性很强的技术基础课，是一般工程教育的必修课。在教学过程中，必须对学生进行传授知识、训练技能和培养能力这三方面的锻炼。值得指出的是，知识、技能和能力是三个不同的概念，而且从掌握知识到形成能力不是直接的，要以技能为中介。因此，在学习本课程时，必须把书本学习和实践训练结合起来。只有这样，才能真正

掌握好本课程的知识，形成必需的专业能力，为今后学习其他课程和从事机械设计、机械加工制造及有关工作奠定良好的基础。



第1章 金属材料的性能

金属材料是机械制造工业中应用最广泛的材料，它具有许多优良的性能，包括使用性能和工艺性能。其中使用性能是指金属材料为保证机械零件或工具正常工作应具备的性能，即在使用过程中所表现出的特性，包括力学性能、物理性能和化学性能。工艺性能是指金属材料适应各种冷、热加工的性能，包括铸造性能、压力加工性能、焊接性能、切削加工性能及热处理性能等。

在机械制造中，除在一些特殊条件下要求材料具有一定的物理、化学性能外，一般在选用材料及设计制造时，都以力学性能指标作为主要依据。材料的力学性能（或称机械性能）是指在外力作用下所表现出来的特性，主要包括强度、硬度、刚度、塑性、韧性、疲劳强度、断裂韧性等。

1.1 材料的静态力学性能

1.1.1 强度

强度是指金属材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力。根据外力性质的不同，可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗扭强度等。一般所说的强度指的是抗拉强度。

抗拉强度是通过静拉伸试验测定的。拉伸试验所用的标准试样分为圆形截面试样和板状试样两种，常用的是圆形试样。它又分为长试样 $l_0 = 10d_0$ 和短试样 $l_0 = 5d_0$ 两种。

拉伸试验时，将金属试样（图 1-1）夹持在拉伸试验机上，对试样缓慢增加拉伸载荷。试样在拉力作用下产生变形并且被不断拉长，直至最终被拉断为止。用低碳钢试样作拉伸试验，可以得到如图 1-2 所示的拉伸曲线。

从拉伸曲线可以看出，当外力小于 P_e 时，试样仅发生弹性变形，变形量与外力成正比关系，此时若去

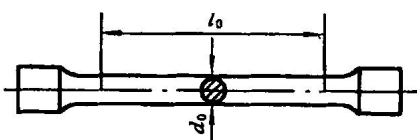


图 1-1 标准拉伸试样

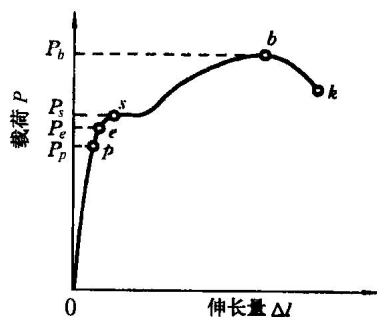


图 1-2 退火低碳钢的拉伸曲线

除外力，试样将恢复到原始长度。当外力大于 P_e 时，试样除发生弹性变形外，还将发生不能回复的塑性变形，此时若去除外力，试样的弹性变形消失，塑性变形部分残留下来，试样将不能完全恢复到原始长度。当外力增加到 P_s 时， s 点附近的曲线呈现一近似水平线段，即发生外力不增加而试样却在连续伸长的现象，这种现象称为“屈服现象”；屈服过后，继续增加外力，则试样发生明显的塑性变形；当外力增加到 P_b 时，试样局部开始变细而发生“缩颈”现象；之后，试样变形集中出现在缩颈附近，由于截面缩小，继续变形所需的外力下降；外力达到 P_k 时，试样在缩颈处断裂。

根据试样拉伸变形与断裂的情况，可以得到工程上最常用的两个强度指标：

1. 屈服强度 σ_s

屈服强度是指金属材料在外力作用下产生屈服现象时的应力，即

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} \quad (\text{MPa})$$

式中 P_s ——试样产生屈服现象时的拉伸力 (N)；

F_0 ——试样原始横截面积 (mm^2)。

有些材料在拉伸曲线上没有明显的屈服点，无法确定开始塑性变形的最低应力值。因此，工程上规定，试样产生 0.2% 残余伸长时的应力值作为该材料的条件屈服强度，用 $\sigma_{0.2}$ 表示，如图 1-3 所示。

2. 抗拉强度 σ_b

抗拉强度是指金属材料在拉断前所能承受的最大应力，即

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0} \quad (\text{MPa})$$

式中 P_b ——试样断裂前的最大拉力 (N)；

F_0 ——试样原始横截面积 (mm^2)。

屈服强度 σ_s 和抗拉强度 σ_b 是工程技术上最重要的性能指标，是设计机械零件和检验材料的重要依据。若零件在工作时发生少量的塑性变形，会引起降低传动精度和影响其他零件的相对运动时，则必须以 σ_s 或 $\sigma_{0.2}$ 来计算；若只要求零件在工作时不发生断裂，就以 σ_b 来计算。

工程上把屈服强度与抗拉强度的比值称为屈强比。屈强比愈小，工程构件的可靠性愈高，一旦超载不至于马上断裂，但屈强比过小，材料强度的有效利用率太低。一般情况下要求屈强比稍高些为好。

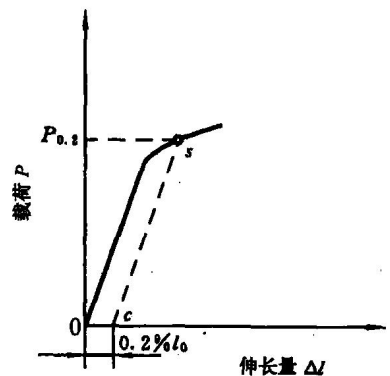


图 1-3 条件屈服强度的确定

1.1.2 塑性

塑性是指金属材料在外力作用下产生永久变形而不致引起破坏的能力。它是进行压力加工、冷弯工艺等的必要条件，也是零件安全使用的标志。

金属材料的塑性指标常用延伸率 δ 和断面收缩率 ψ 来表示，其计算公式为

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

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$$

式中 l_0 ——试样原始标距长度 (mm);

l_1 ——试样拉断后的标距长度 (mm);

F_0 ——试样原始横截面积 (mm^2);

F_1 ——试样拉断后缩颈处的最小横截面积 (mm^2)。

金属材料的 δ 和 ψ 愈大, 则材料的塑性就愈好。伸长率表示试样拉断时的相对伸长量, 与试样长度有关, 同一种材料用不同长度的试样得到的 δ 值不同。长试样的伸长率用 δ_{10} 或 δ 表示, 短试样的伸长率用 δ_5 表示。对同一种材料, 通常短试样 δ_5 大于长试样 δ_{10} 。断面收缩率表示试样拉断时截面的相对收缩量, 与试样的长度无关, 因而它比伸长率更能反映材料塑性的好坏。

1.1.3 硬度

硬度是指金属材料抵抗更硬物体压入其表面的能力。它是衡量材料软硬程度的力学性能指标。硬度值的物理意义随测定方法的不同而异。硬度测定方法主要有压入法、刻画法、回跳法等, 其中以压入法的应用最为普遍。即在规定的静态试验力作用下, 将一定的压头压入金属材料表面层, 然后根据压痕的面积大小或深度测定其硬度值。根据载荷、压头和表示方法的不同, 工程上常用的有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等。

1. 布氏硬度

布氏硬度的试验原理如图 1-4 所示。用一定的载荷 P , 将直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球压入被测材料的表面, 保持一定时间后卸去载荷, 以载荷与压痕表面积的比值作为布氏硬度值, 用符号 HB 表示。从几何关系可求得

$$\text{HB} = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{MPa})$$

式中 P ——试验时的压力 (kN 或 kgf^*);

F ——试样的压痕表面积 (mm^2);

D ——压头的直径 (mm);

d ——压痕的平均直径 (mm)。

试验时只要测出压痕直径的大小, 就可通过计算或查布氏硬度表得出硬度值。布氏硬度习惯上不标单位, 其数值愈大, 表示材料愈硬。

布氏硬度计压头中圆球的材质对测得的硬度值有影响。根据国标规定, 凡小于 450HB 的材料, 使用淬火钢球作为压头, 测得布氏硬度值用 HBS 表示; 而大于 450HB 小于

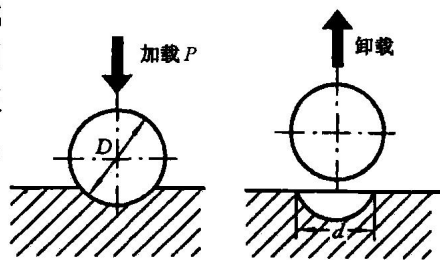


图 1-4 布氏硬度试验原理示意图

*: kgf (千克力) 是非法定计量单位, 因材料力学中多用此作为基本量, 故保留。1 kgf = 9.8N。

650HB 的材料，使用硬质合金球作压头，其测得的布氏硬度值用 HBW 表示。我国目前很少采用硬质合金压头。

布氏硬度值的标注方法是，测定的硬度值应标注在硬度符号的前面，硬度符号后面应标出压头直径、载荷大小和载荷保持时间（10~15s 不标注）。例如，120HBS10/1 000/30 表示用直径为 10mm 的淬火钢球，在 9.8kN（1 000kgf）载荷作用下，保持 30s 测得的布氏硬度值为 120。若采用压头直径为 10mm，载荷为 29.43kN（3 000kgf），保持时间为 10s 的试验条件，测得的硬度值不标出试验条件，记为 120HBS。

布氏硬度的试验规范如表 1-1 所示。

表 1-1 布氏硬度实验规范

材料	硬度 HBS	试样厚度/mm	P/D^2	D/mm	P/N (kgf)	载荷保持时间/s
钢铁材料	140~450	6~3	30	10	29 400 (3 000)	10
		4~2		5	7 350 (750)	
		<2		2.5	1 837.5 (187.5)	
	<140	>6	10	10	9 800 (1 000)	10
		6~3		5	2 450 (250)	
		<3		2.5	612.5 (62.5)	
铜合金及 镁合金	36~130	>6	10	10	9 800 (1 000)	30
		6~3		5	2 450 (250)	
		<3		2.5	612.5 (62.5)	
铝合金及 轴承合金	8~35	>6	2.5	10	2 450 (250)	60
		6~3		5	612.5 (62.5)	
		<3		2.5	152.88 (15.6)	

布氏硬度试验的特点是压痕较大，代表性和重复性强，所测硬度值较准确，常用于灰铸铁、铸钢、非铁金属及合金，以及经退火、正火或调质处理后的各种钢材的硬度测量。但由于试验过程较费事，压痕较大，因此，不宜用于大批量的生产检验及成品或薄片金属的硬度检验，特别是对表面质量要求较高的零件。为保证布氏硬度测量的准确性，布氏硬度只能测量硬度不高的材料。

实践证明，在一定的范围内，材料的硬度值与抗拉强度之间存在着一定关系，其经验公式为低碳钢 $\sigma_b \approx 0.36\text{HBS}$ ；高碳钢 $\sigma_b \approx 0.34\text{HBS}$ ；合金调质钢 $\sigma_b \approx 0.33\text{HBS}$ ；灰铸铁 $\sigma_b \approx 0.1\text{HBS}$ 。

2. 洛氏硬度

洛氏硬度的试验原理如图 1-5 所示。用规定的载荷将锥角为 120° 的金刚石圆锥体或直径为 1.588mm 的淬火钢球压入被测材料的表面，根据压痕深度来衡量材料的硬度。

试验时，先加初载荷，压痕深度为 h_1 ，然后再加主载荷，压痕深度为 h_2 。卸去主载荷，保留初载荷，因压痕处材料弹性变形的恢复，这时实际压痕深度为 h_3 。故由主载荷引起的塑性变形而产生的压痕深度增

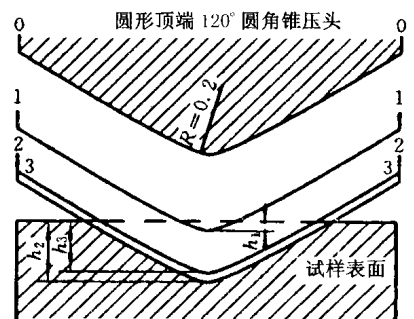


图 1-5 洛氏硬度实验原理图