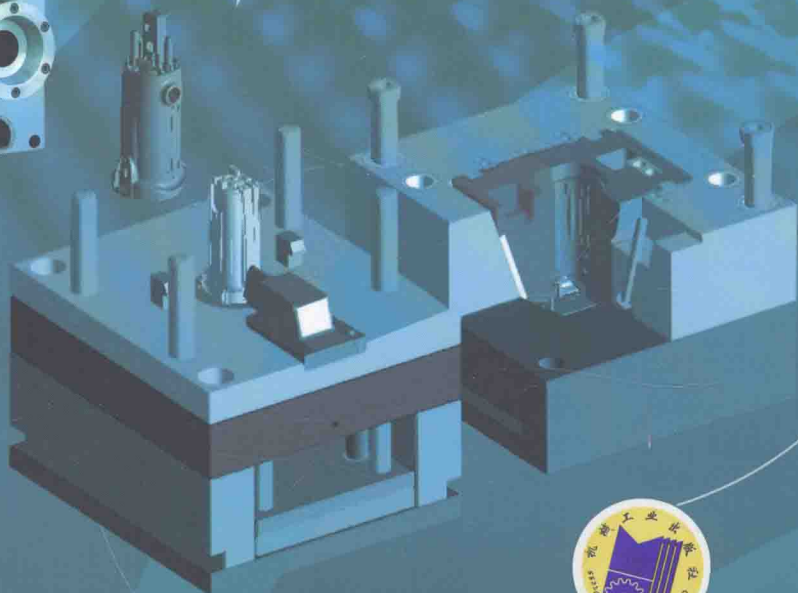
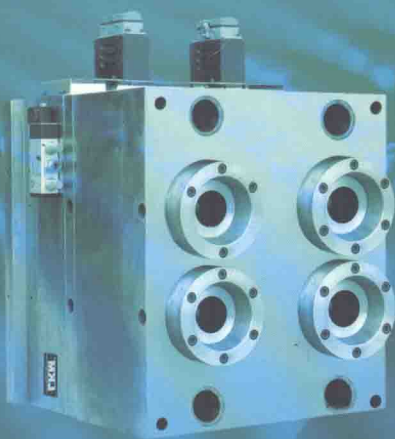


职业院校重点专业规划教材
模具设计与制造专业教学用书

模具材料及 材料成形工艺

MUJU CAILIAO JI CAILIAO CHENGXING GONGYI

艾小玲 石淑琴 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

职业教育院校重点专业规划教材
模具设计与制造专业教学用书

模具材料及材料成形工艺

主 编 艾小玲 石淑琴
副主编 熊承刚
参 编 朱 红 徐 立 葛莉玲 张均红
主 审 熊其兴



机 械 工 业 出 版 社

本书系统地介绍了模具材料及材料成形工艺的基本知识,全书共15章,内容包括金属材料的性能、金属的结构与结晶、金属的塑性变形与再结晶、钢的热处理、工业用钢、铸铁、模具材料概述、热作模具材料及其热处理、塑料模具材料及其热处理、冷作模具材料及其热处理、非铁金属及粉末冶金材料、非金属材料及新型材料简介、金属材料的铸造成形、金属的锻压成形工艺和金属的焊接成形工艺。

本书适合高等职业技术学院和成人教育的机械制造及自动化专业、模具设计与制造专业及近机类等相关专业选用,同时可作为机械类工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

模具材料及材料成形工艺/艾小玲,石淑琴主编. —北京:机械工业出版社,2011.7

职业教育院校重点专业规划教材

模具设计与制造专业教学用书

ISBN 978-7-111-34559-6

I. ①模… II. ①艾…②石… III. ①模具-工程材料-高等职业教育-教材②模具-工程材料-成型-工艺-高等职业教育-教材
IV. ①TG76

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第175593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:汪光灿 责任编辑:汪光灿 王莉娜

版式设计:张世琴 责任校对:张媛

封面设计:陈沛 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011年10月第1版第1次印刷

184mm×260mm·13.25印张·326千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-34559-6

定价:27.00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

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据教育部职业教育关于职业技术教学改革的意见、职业教育的特点和近几年材料的发展以及对职业院校学生的培养要求,在总结近几年职业教育专业基础课程改革的基础上编写的。

随着高等职业教育的发展,重整课程,优化教学资源,突出实用性、综合性和先进性成为了课程改革的新方向。本书采用最新国家标准,结合先进科学技术,充分考虑高职高专的特色,将原工程材料、模具材料和材料成形工艺等内容有机地融合在一起,并对原有内容和结构进行了相应的调整和补充。因此,编写本书的目的,就是使学生在掌握了一般机械 engineering 材料及普通热处理工艺的知识后,能够进一步较全面地了解各种模具材料的性能、热处理工艺和表面处理技术,进而制订正确的热处理工艺,以提高模具的使用寿命,降低生产成本,提高产品的经济效益,这也是本书与其他同类教材的不同之处。

本书共 15 章,涵盖工程材料及热处理、金属热加工工艺等知识。

本书由艾小玲和石淑琴任主编,由熊承刚任副主编,朱红、徐立、葛莉玲、张均红等参加编写。其中艾小玲编写绪论和第 1、2、4、5 章,并负责全书统稿;石淑琴编写第 7、8 章;徐立编写第 9 章;葛莉玲编写第 10 章;朱红编写第 3、6、11、12 章;熊承刚编写第 13、14 章;张均红编写第 15 章。本书由熊其兴主审。

本书在编写过程中得到了武汉职业技术学院、浙江机电职业技术学院、武汉船舶职业技术学院等院校老师的指导和帮助,在此表示感谢。

由于编者水平有限,书中错误和缺点在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
绪论	1
第1章 金属材料的性能	3
1.1 金属材料的力学性能	3
1.2 金属材料的高温力学性能	11
1.3 金属材料的物理性能	12
思考题	14
第2章 金属的结构与结晶	15
2.1 金属的结构	15
2.2 金属的结晶	20
思考题	33
第3章 金属的塑性变形与再结晶	34
3.1 金属的塑性变形	34
3.2 冷塑性变形对金属组织和性能的影响	37
3.3 回复与再结晶	39
3.4 金属的热塑性变形	41
思考题	42
第4章 钢的热处理	44
4.1 钢的热处理基础	44
4.2 钢在冷却时的组织转变	47
4.3 钢的普通热处理	52
4.4 钢的表面热处理	59
4.5 金属材料热处理工艺设计	64
思考题	69
第5章 工业用钢	70
5.1 铁碳合金	70
5.2 常存元素和合金元素对钢性能的影响	71
5.3 碳素钢	74
5.4 合金钢	78
思考题	91
第6章 铸铁	93
6.1 铸铁的石墨化	93
6.2 常用铸铁	94
思考题	99
第7章 模具材料概述	100
7.1 模具及模具材料的分类	100
7.2 模具材料的主要指标	101
7.3 模具材料	103
7.4 模具的制造工艺	104
7.5 模具的使用与维护	104
思考题	105
第8章 热作模具材料及其热处理	106
8.1 热作模具的工作条件及失效形式	106
8.2 热作模具材料的性能要求	108
8.3 热作模具材料的选材和热处理	109
思考题	115
第9章 塑料模具材料及其热处理	116
9.1 塑料模具的工作条件及失效形式	116
9.2 塑料模具对材料的性能要求	117
9.3 塑料模具材料的分类及热处理	118
9.4 塑料模具的选材及热处理实例	121
9.5 塑料模具的热处理特点	123
思考题	126
第10章 冷作模具材料及其热处理	127
10.1 冷作模具的工作条件及失效形式	127
10.2 冷作模具材料的性能要求	129
10.3 冷作模具材料的种类及热处理	131
思考题	142
第11章 非铁金属及粉末冶金材料	143
11.1 铝及铝合金	143
11.2 铜及铜合金	147
11.3 轴承合金	150



11.4 粉末冶金及硬质合金	152	14.1 锻压成形工艺概述	175
思考题	154	14.2 坯料的加热与锻件的冷却	175
第 12 章 非金属材料及新型材料		14.3 锻压方法与工艺	176
简介	155	思考题	185
12.1 工程塑料	155	第 15 章 金属的焊接成形工艺	186
12.2 工业橡胶	157	15.1 概述	186
12.3 陶瓷材料	158	15.2 焊接方法与工艺	186
12.4 复合材料	159	15.3 气焊和气割	192
思考题	161	15.4 埋弧焊	196
第 13 章 金属材料的铸造成形	162	15.5 电阻焊	196
13.1 概述	162	15.6 常用金属材料的焊接	198
13.2 铸造方法	162	15.7 焊接缺陷分析	201
13.3 铸造工艺	168	思考题	204
思考题	174	参考文献	206
第 14 章 金属的锻压成形工艺	175		

绪 论

1. 材料科学与模具材料的概述

材料是人类生活和生产的物质基础,是社会发展的基石。翻开人类进化史,我们不难发现,材料的开发、使用和完善都贯穿其始终,从天然材料的应用到陶瓷、青铜器的制造,从钢铁的冶炼到材料的合成,人类成功地生产出满足自身需求的材料,从而使自身走出深山,奔向茫茫平原、辽阔的海洋,飞向广袤的太空。由此可见,材料的划时代作用是不容忽视的,它犹如支撑万丈高楼的基石,支撑着人类文明,成为人类文明进步的标志。

材料的用途很多,广义地讲,食品、药品、燃料、木材、沙石、肥料、水、空气等都是材料,但一般工业和工程领域中所说的材料是指工程材料,即用于制造工程构件、机械零件、工模具等的材料,如金属材料、陶瓷材料、聚合物和复合材料等。

模具是一种重要的加工工艺装备,是国民经济各工业部门发展的重要基础之一。模具性能的好坏、寿命的长短,直接影响产品的质量和经济效益。模具的材料、热处理与表面处理的方法是影响模具寿命的主要因素。所以,目前世界各国都在不断地开发模具新材料,改进强化热处理新工艺和表面强化新技术。

成形技术的发展也同样促进了科学技术的发展。如实型铸造方法的出现,使铸造的质量精度、工人的作业环境得到了大幅度的改善;又如精密模锻锻造出的齿轮,无需再进行切削加工,就可以使流线合理分布,提高了零件的承载能力,减少了制造工序,缩短了生产周期,提高了生产率。

2. 本教材的内容、特点及性质

(1) 内容 本教材介绍了钢铁、铝、铜、轴承合金、塑料、橡胶、陶瓷、复合材料等常用材料的牌号、性能及应用,并围绕材料的化学成分、组织、结构及加工工艺对性能的影响规律而展开,突出了工程材料特别是模具材料的选择、使用、强化和热加工等工程应用方面的内容。其中模具材料及其加工方法的选择是一个非常复杂的问题,使学生掌握这方面的知识是本课程的主要任务之一。

近几年,我国模具材料发展迅速,在冷作模具用钢方面开发出了一批高性能的新钢种如 7Cr7Mo2VSi (LD)、7CrSiMnMoV (CH-1)、9Cr6W3Mo2V2 (GM),这些钢种具有较高的强韧性、耐磨性和良好的综合工艺性能。在热作模具用钢方面,结合国内资源研制了十几种新钢种,如 4CrMnSiMoV 和 5Cr2NiMoVSi,其性能优于 5CrMnMo;热锻、热挤、精锻用的 4Cr3Mo3W4VNb (GR)、3Cr3MoVNb (HM3) 和 3Cr3Mo3W2V (HM1),具有高的热稳定性、高温强度、热疲劳性及耐磨性。这些模具用钢经过强化处理和表面处理后,其模具的综合性能和使用寿命得到了显著提高。

除此之外,本教材还讲述了铸、锻、焊等成形方法和热处理的基本原理。

(2) 特点及性质 本课程是机械、模具类专业的专业基础课,课程内容以定性描述为主,具体表现为“三多”,即名词、概念、术语多,定性描述、经验总结多,记忆性的内容、规律多。这会使学生在学习过程中感到枯燥,产生厌学、畏难情绪。因此,学生在学习



本课程的过程中一是应了解材料的成分、组织、结构及工艺之间的关系；二是应掌握各种工程材料（重点是金属材料）和模具材料的基本特性和应用范围；三是要注意前后知识的衔接与综合应用，重视实验、实习教学环节，把握重点、以点带面，才能高效率地学好本课程。

模具是一种重要的加工工艺装备，是国民经济各工业部门发展的重要基础之一。模具性质的好坏、寿命的长短，直接影响产品的质量。因此，本课程前面几个知识点讲授工程材料的基础理论，在此基础上重点讲述模具材料的选择及应用，将普通工程材料与模具材料有机地结合起来。

3. 学习目的及任务

（1）目的 通过本课程的学习，学生可掌握有关机械工程材料的基本理论和基本知识及成形加工工艺方法，为将来应用工程材料及模具材料和学习有关课程奠定坚实的基础。

学习本课程的目的，就是使学生在掌握了一般模具材料及热处理的知识后，能够较全面地了解各种模具材料的性能、热处理工艺和表面处理技术，从而合理地选择模具材料，制订正确的热处理工艺流程，以提高模具的使用寿命，降低生产成本，提高产品的经济效益。

（2）任务 通过本课程的学习，学生应了解材料的成分、组织结构、工艺手段及外界条件改变时对其性能的影响；掌握各种模具材料（重点是金属材料）的基本特性和应用范围及其强化和改善性能的途径、基本原理与方法；了解模具材料及模具表面处理技术的现状和发展趋势，掌握各类模具材料的特性、强韧化方法和使用范围，初步具备选用常用模具材料及其热处理方法的能力；初步具有正确选择一般机械零件的热处理工艺、成形加工方法及确定其工序位置的能力。

金属材料的性能

为了更好地研究材料的成分、组织和性能之间的关系,合理选择和使用材料,应充分了解材料的性能。材料的性能包括使用性能和工艺性能。材料的使用性能是指材料在保证机械零件或工具正常使用状态下应具备的性能,包括力学性能、物理性能和化学性能等。材料的工艺性能是指材料在机械零件或工具制造中应具备的性能,包括切削加工性能和热加工性能。

1.1 金属材料的力学性能

金属材料的力学性能是指材料抵御载荷(即外力)作用的能力,包括强度、刚度、硬度、塑性、韧性和疲劳强度等。力学性能是设计和制造零件最重要的指标,也是控制材料质量的主要参数,制造各类构件的金属材料都要满足规定的力学性能指标。

1.1.1 强度

1. 拉伸试验

拉伸试验是指用静拉力对拉伸试样进行缓慢的轴向拉伸,直至拉断的一种试验方法。在拉伸试验中和拉伸试验后,可测量力的变化与试样相应的伸长量,从而得出材料的强度与塑性的关系。材料在拉伸力作用下一般会出现三个过程,即弹性变形、塑性变形和断裂。弹性变形是指材料在载荷卸除后能恢复到原形的变形,而塑性变形是载荷卸除后永久保留下来的变形。对于不同类型的载荷,这三个过程的发生和发展是不同的,使用中一般多用静拉伸试验法来测定金属材料的强度和塑性指标。低碳钢试样的拉伸过程具有典型意义。试验时,将拉伸试样制成如图 1-1 所示,在拉伸试验机上缓慢增加载荷,记录载荷与伸长量的数值,直至试样拉断,便可获得如图 1-2 所示的载荷与伸长量之间的关系曲线,即拉伸曲线。

当载荷不超过 F_e 时,若除去载荷,试样恢复到原来的形状,这一阶段(OE 段)称为弹性变形阶段,在此阶段,载荷与伸长量成正比关系,载荷 F_e 是使试样只产生弹性变形的最大载荷。

当载荷超过 F_e 时,卸除载荷后,试样不能恢复到原来的状态,即产生了塑性变形。当载荷增加到 F_s

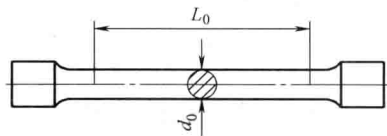


图 1-1 钢的拉伸试样

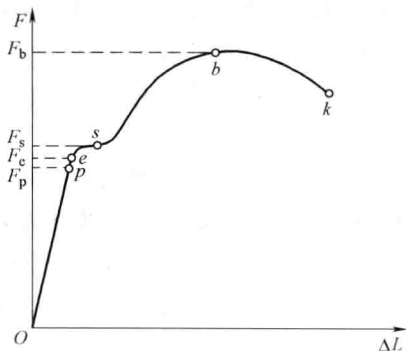


图 1-2 退火低碳钢拉伸曲线

时, 即 (es 段) 曲线出现一个小平台, 此平台表明不增加载荷试样仍继续变形, 好像材料已经失去抵御外力的能力而屈服了, 这种现象称为屈服。只有再继续增加载荷, 材料才继续伸长, 此时试样已产生大量的塑性变形, 直到增至最大载荷 F_b 时为止。在 sb 段, 试样沿整个长度均匀伸长。当载荷达到 F_b 后, 试样就在某个薄弱部分出现“缩颈”。由于试样局部截面积的逐步减小, 试样所能承受的载荷也逐渐减小, 直到最终断裂。

2. 常用的强度指标

强度是指材料在载荷作用下抵抗变形和断裂的能力。

无论何种材料, 其内部原子之间都受到相互平衡的原子力的作用, 以保持其固定的形状。材料在外力作用下, 其内部会产生相应的作用力以抵抗变形, 这种作用力称为内力。材料单位截面积上承受的内力称为应力, 用 σ 表示, 即

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

式中 F ——载荷 (N);

S_0 ——试样的原始横截面积 (mm^2)。

金属材料的强度是用应力来表示的。常用的强度指标有弹性极限、屈服强度和抗拉强度。

(1) 弹性极限 弹性极限是指试样在弹性范围内承受的最大拉应力, 用符号 σ_e 表示, 即

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0}$$

式中 F_e ——载荷 (N);

S_0 ——试样的原始横截面积 (mm^2)。

(2) 屈服强度 试样屈服时的应力为材料的屈服点, 称为屈服强度, 用 σ_s 表示。 σ_s 表示金属抵抗小量塑性变形的能力, 即

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0}$$

式中 F_s ——试样屈服时的载荷 (N);

S_0 ——试样的原始横截面积 (mm^2)。

有些金属材料, 如大多数合金钢、高碳钢和铸铁等, 其拉伸曲线不出现平台, 即没有明显的屈服现象, 因此工程上规定将试样产生微量塑性变形 (0.2%) 时的应力作为该材料的屈服强度, 称为材料的条件屈服强度, 用 $\sigma_{0.2}$ 表示, 如图 1-3 所示。

屈服强度是评定材料质量的重要力学性能指标, 许多机械零件在使用中是不允许发生塑性变形的, 例如气缸螺栓若发生塑性变形, 就会使气缸漏气。

(3) 抗拉强度 抗拉强度是指试样在拉断前所承受的最大拉应力, 即

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0}$$

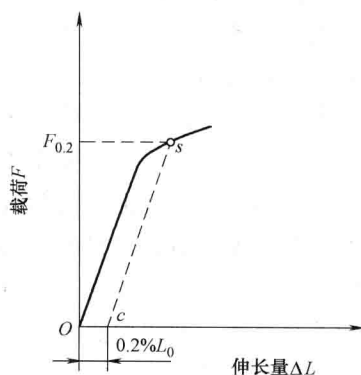


图 1-3 条件屈服强度的确定



式中 σ_b ——抗拉强度 (MPa);

F_b ——试样在断裂前的最大载荷 (N);

S_0 ——试样的原始横截面积 (mm^2)。

σ_b 代表金属材料抵抗大量塑性变形的能力,表征材料在拉伸条件下所能承受的最大拉力的应力值,因此 σ_b 越大,说明材料抵抗断裂的能力越强,即强度越高。抗拉强度是工程技术上的主要指标。

一般情况下,机器构件都是在弹性状态下工作的,不允许发生微小的塑性变形,所以在机械设计时应采用 σ_s 或 $\sigma_{0.2}$ 强度指标,并适当加上安全系数。评价冷作模具材料塑性变形能力的指标主要是常温下的屈服点或屈服强度,评价热作模具材料塑性变形能力的指标则应为高温屈服点或高温屈服强度。

σ_s/σ_b 称为屈服比,它是一个很有意义的指标。一般情况下,要求屈服比稍高些为好,且比值越大越能发挥材料的潜力,也能减少结构的自重。但为了安全起见,此值不宜过大,适合的比值为 0.65 ~ 0.75。

1.1.2 刚度

在外力作用下,材料抵抗弹性变形的能力称为刚度。衡量刚度大小的指标是弹性模量。弹性模量是材料在弹性变形范围内,应力与应变(试样的相对伸长量 $\Delta L/L_0$) 的比值,即

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{\text{弹}}}$$

式中 E ——弹性模量 (MPa);

σ ——在弹性范围内的应力 (MPa);

$\varepsilon_{\text{弹}}$ ——在弹性范围内的应变 (%)。

弹性模量 E 是表征在拉应力作用下金属抵抗弹性变形的能力, E 越大,金属抵抗弹性变形的能力就越强。从上式可知,在相同载荷作用下,材料的受力面积越大,材料的刚度就越大。材料的弹性模量与材料原子间的结合力有关,常用的强化手段如热处理和冷压力加工等,不能改变其弹性模量。因此,要提高刚度,只有增大横截面积或更换弹性模量更高的材料。

1.1.3 塑性

金属材料在静载荷作用下产生塑性变形而不被破坏的能力称为塑性,常用的塑性指标有断后伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 两种。

1. 断后伸长率

断后伸长率是指试样被拉断时的标距长度的伸长量与原始标距长度的百分比,用符号 δ 表示,即

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中 L_0 ——试样原始标距长度 (mm);

L_1 ——试样拉断时的标距长度 (mm)。

在材料手册中常常可以看到 δ_5 和 δ_{10} 两种符号,它分别表示用 $L_0 = 5d$ 和 $L_0 = 10d$ (d 为

试样直径) 两种不同长度试样测定的断后伸长率。对同一种材料所测得的 δ_5 和 δ_{10} 的值是不同的, δ_5 要大于 δ_{10} , 如钢材的 δ_5 大约为 δ_{10} 的 1.2 倍, 所以, 相同符号的断后伸长率才能进行比较。

2. 断面收缩率

断面收缩率是指试样被拉断时, 缩颈处横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比, 用符号 ψ 表示, 即

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

式中 S_k ——试样拉断后最小横截面积 (mm^2);

S_0 ——原始横截面积 (mm^2)。

断面收缩率不受试样标距长度的影响, 因此能更可靠地反映材料的塑性。对必须承受强烈变形的材料, 塑性指标具有重要意义。塑性优良的材料其冷压成形性好, 此外, 重要的受力零件也要求具有一定的塑性, 以防止超载时发生断裂。

断后伸长率和断面收缩率也表明材料在静态或缓慢增加的拉应力下的韧性。

塑性指标不能直接用于零件的设计计算, 只能根据经验来选定材料的塑性。一般来说, 断后伸长率达 5% 或断面收缩率达 10% 的材料, 即可满足绝大多数零件的要求。

1.1.4 硬度

硬度是指材料抵抗局部塑性变形的能力, 是反映材料软硬程度的力学性能指标, 是材料的一个重要指标。实际上, 硬度是表征材料的弹性、塑性、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, 其测试方法简便、迅速, 不需要专门试样, 也不损坏试样, 而且测试设备也很简单。对于大多数金属材料, 还可以从硬度值估算出其抗拉强度。硬度值是通过试验测得的, 目前应用最广泛的硬度试验方法有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等试验。

1. 布氏硬度

布氏硬度试验原理如图 1-4 所示。用一规定直径 ($D = 10.5\text{mm}$ 或 $D = 2.5\text{mm}$) 的硬质合金球以一定的试验力压入所测表面, 保持一定时间后卸除试验力, 随即在金属表面出现一个压痕。以压痕单位面积上所承受试验力的大小确定被测材料的硬度值, 用符号 HBW 表示, 即

$$\text{HBW} = \frac{F}{S} = 0.102 \frac{F}{\pi DH} \text{N/mm}^2$$

式中 F ——试验力 (kgf, $1\text{kgf} = 9.80665\text{N}$);

S ——压痕表面积 (mm^2);

H ——压痕深度 (mm);

D ——钢球 (压头) 直径 (mm)。

由于压痕深度 H 的测量比较困难, 而测量压痕直径 d 比较方便, 因此上式中的 H 可换算成压痕直径 d , 即

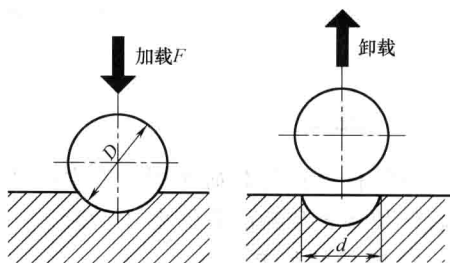


图 1-4 布氏硬度试验原理示意图

$$HBW = 0.102 \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中 d ——压痕直径 (mm)。

试验时，用刻度放大镜测出压痕直径后，就可以通过计算或查布氏硬度表得出相应的硬度值。布氏硬度习惯上不标注单位。

由于金属材料软硬不同，工件的薄厚、大小不同，如果仅采用一种标准的试验力 F 和钢球直径 D ，就会出现如下现象：如果适用于较硬的材料，则对较软的材料就会出现钢球陷入金属内部的现象；若适用于较厚的材料，则对较薄的材料就会产生压透现象等。因此在生产中进行布氏硬度试验时，要求使用不同大小的试验力和不同直径的钢球或硬质合金球。所以在进行布氏硬度试验时，钢球直径 D 、试验力 F 与保持时间，应根据所测试金属的种类和试样厚度，按表 1-1 列出的布氏硬度试验规范正确进行选择。

由于硬度和强度都以不同形式反映了材料在外力作用下抵抗塑性变形的能力，因而硬度和强度之间有一定的关系，如低碳钢 $HBW \approx \sigma_b/3.6$ ，高碳钢 $HBW \approx \sigma_b/3.5$ ，调质钢 $HBW \approx \sigma_b/3.25$ 等。

布氏硬度压痕面积较大，能反映较大范围内金属各组成部分的平均性能，因此试验结果较准确。但由于布氏硬度试验留下的压痕较大，不适宜用来检验薄件和成品件，也不适宜检测太硬的材料，布氏硬度试验适于测量布氏硬度值小于 650HBW 的材料。

表 1-1 布氏硬度试验规范

材 料	硬度 HBW	试样厚度 /mm	F/D^2	D /mm	F /N (kgf)	载荷保持时间 /s
钢铁材料	140 ~ 450	6 ~ 3	30	10	29400 (3000)	10
		4 ~ 2		5	7350 (750)	
		< 2		2.5	1837.5 (187.5)	
	< 140	> 6 6 ~ 3 < 3	10	10 5 2.5	9800 (1000) 2450 (250) 612.5 (62.5)	10
铜合金及 镁合金	36 ~ 130	> 6	10	10	9800 (1000)	30
		6 ~ 3		5	2450 (250)	
		< 3		2.5	612.5 (62.5)	
铝合金及 轴承合金	8 ~ 35	> 6	10	10	2450 (250)	60
		6 ~ 3		5	12.5 (62.5)	
		< 3		2.5	152.88 (15.6)	

2. 洛氏硬度

洛氏硬度试验法是用直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球在初载荷与初、主载荷先后作用下，将压头压入试样表面，经规定的保持时间后卸除主载荷，根据压痕深度确定金属硬度值。根据所用压头的种类和所加的试验力，洛氏硬度分为 HRA、HRB、HRC 及 HRF 等。

如图 1-5 所示为洛氏硬度试验原理图。进行洛氏硬度试验时，先加初试验力 F_0 ，压头压入试样表面，深度为 h_1 ，目的是为了消除因试样表面不平整而造成的误差；然后再加主试



验力 F_1 ，在主试验力的作用下，压头压入深度为 h_2 ；卸除主试验力，保持初试验力，由于金属弹性变形的恢复，使压头回升到压痕深度为 h_3 的位置。那么，由主试验力所引起的塑性变形而使压头压入试样表面的深度 $e = h_3 - h_1$ ，称为残余压痕深度增量。显然， e 值越大，被测金属的硬度越低，而人们习惯上认为数值越大，硬度越高，因而采用一常数减去压痕深度后的数值表示洛氏硬度。按 GB/T 230.1—2004 的规定，将压头每压入 0.002mm 深度作为一个硬度单位，这样，洛氏硬度的计算公式为

$$HR = K - \frac{e}{0.002}$$

式中 K ——常数（金刚石做压头， $K = 100$ ；淬火钢球做压头， $K = 130$ ）；

e ——残余压痕深度增量（mm）。

洛氏硬度的数值可直接从硬度计上读出，不需要查表和换算，非常方便。它没有单位，测量范围大，试样表面压痕小，可直接测量成品或较薄工件的硬度，但也由于压痕小，对组织硬度不均匀的材料，测量结果不准确，故需在试样的不同部位测定三点取其算术平均值。洛氏硬度与布氏硬度之间以及与其他硬度之间没有理论上的相应关系，不能直接比较。洛氏硬度及其应用范围见表 1-2。

表 1-2 洛氏硬度及其应用范围

硬度符号	压头类型	总载荷 F_a/N (kgf)	硬度值有效范围	应用举例
HRA	120°金刚石圆锥体	588 (60)	70 ~ 85HRA	硬质合金、表面淬火、渗碳钢
HRB	φ1.588mm 淬火钢球	980 (100)	25 ~ 100HRB	非金属、退火钢、铜合金等
HRC	120°金刚石圆锥体	1471.1 (150)	20 ~ 67HRC	淬火钢、调质钢

3. 维氏硬度

维氏硬度的试验方法与布氏硬度基本相同，不同的是维氏硬度采用的压头是夹角为 136°的金刚石四棱锥，且试验力可以任意选择。维氏硬度也是以单位压痕面积所承受的载荷作为硬度值的。将压头在选择的试验力作用下压入被测材料表面，保持一定时间后卸载，然后再测量压痕两对角线平均长度 d ，计算出压痕的表面积，最后求出压痕表面积上的平均压力 F/S ，如图 1-6 所示，以此作为被测材料的维氏硬度值，用符号 HV 表示。故维氏硬度值为

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{d^2}{2 \sin 68^\circ}} = 0.1891 \frac{F}{d^2}$$

式中 F ——压力（N）；

d ——压痕对角线平均长度（mm）。

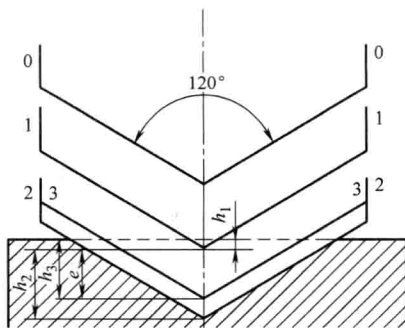


图 1-5 洛氏硬度试验原理图

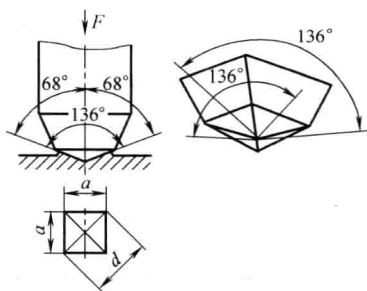


图 1-6 维氏硬度试验示意图



1.1.5 冲击韧性

前面所讲述的力学性能如强度、塑性、硬度都是在静载荷作用下测得的力学性能指标,而实际上有许多工件是在冲击载荷作用下工作的,如冲模上的冲头、锻锤的锤杆、飞机的起落架、变速器的齿轮等。对于这些承受冲击载荷的工件,不仅要求有高的强度和一定的塑性,还必须有足够的冲击韧性。

金属材料在冲击载荷作用下抵抗破坏的能力称为冲击韧性。目前,测量冲击韧性最普通的方法是一次摆锤弯曲冲击试验。试验时,将材料制成带缺口的标准试样,如图1-7所示,并将其放在冲击试验机的机座上,让一自重为 G 的摆锤自高度为 H 处自由下摆,摆锤冲断试样后又升至高度为 h 处,如图1-8所示。摆锤冲断试样所失去的能量即为试样在被冲断过程中吸收的能量,用 A_K 表示。断口处单位面积上所消耗的冲击吸收能量即为材料的冲击韧性,用 a_K 表示,即

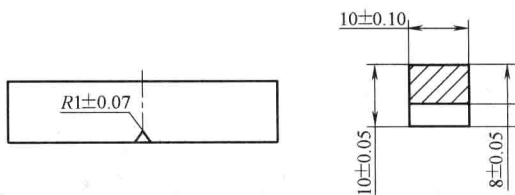


图1-7 冲击试样

断口处单位面积上所消耗的冲击吸收能量即为材料的冲击韧性,用 a_K 表示,即

$$a_K = \frac{A_K}{S} = \frac{G(H-h)}{S}$$

式中 a_K ——冲击韧性 ($J \cdot cm^{-2}$);

S ——试样缺口处的横截面积 (cm^2);

A_K ——冲击吸收功 (J);

G ——摆锤自重 (kgf);

H ——摆锤初始高度 (m);

h ——摆锤冲断试样后上升的高度 (m)。

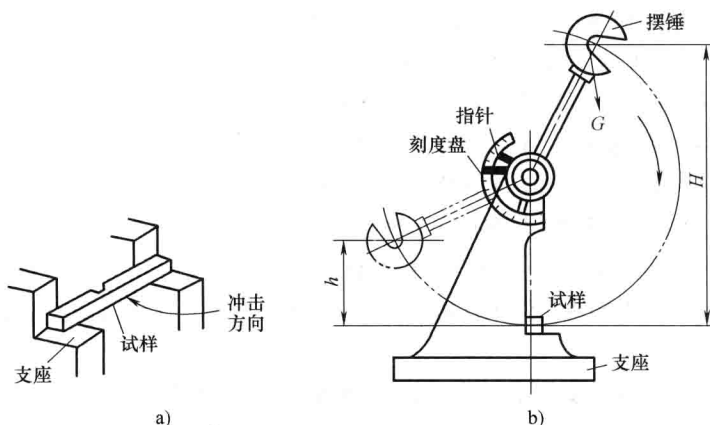


图1-8 一次摆锤弯曲冲击试验原理图

这种试验方法的冲击速度较大,试样又开有缺口,能灵敏地反映材料脆性断裂的趋势,因而能较灵敏地反映金属材料在冶金和热处理等方面的质量问题。

实际上,机械零件很少是受一次冲击就破坏的,大多数情况下是承受小能量、多次重复的冲击载荷。在这种情况下,以冲击韧性作为性能指标来选择材料就不合适了。实践表明,



冲击韧度高的金属材料，小能量多次冲击的抗力不一定高。一般金属材料受大能量的冲击载荷作用时，其冲击抗力主要取决于金属的塑性，而在小能量多次冲击的情况下，其冲击抗力取决于金属的强度。

对一般钢材来说，所测冲击吸收能量 A_K 越大，材料的韧性越好。但由于测出的冲击吸收能量的组成比较复杂，所以有时测得的 A_K 值及计算出的冲击韧度 a_K 不能真正反映材料的韧脆性质。冲击韧度除与材料的自身性能有关外，还与试验测试温度、试样尺寸、缺口形状和加载速度等因素有关。一般而言，随着试验温度的下降，材料的冲击韧度会降低，呈现脆性，如图 1-9 所示，脆性转变温度越低，材料的低温冲击韧度就越好。普通碳素钢的脆性转变温度为 $-30 \sim 20^\circ\text{C}$ 。

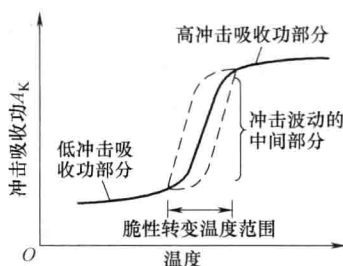


图 1-9 温度对冲击韧度的影响

1.1.6 疲劳强度

有些机器零件如轴、齿轮、连杆和弹簧等，在交变载荷长期作用下，往往在工作应力低于屈服强度的情况下突然破坏，这种现象称为疲劳。所谓交变应力，是指大小、方向随时间呈周期性变化的应力。金属材料在交变应力作用下产生疲劳裂纹并使其扩展而导致的断裂称为疲劳断裂。据统计，约有 80% 以上的零部件失效是由疲劳引起的。不管是对于脆性材料还是韧性材料，疲劳断裂都是突发的，事先均无明显的塑性变形，因此它具有很大的危险性，常造成严重的事故。

疲劳强度是指材料经受无数次的应力循环仍不断裂的最大应力，表示材料抵抗疲劳断裂的能力。

测定材料的疲劳强度应在不同交变载荷下进行试验，通过试验可得材料承受的交变应力 σ 和断裂前应力循环次数 N 之间的关系曲线，即疲劳曲线，如图 1-10 所示。从曲线上可以看出，应力值越低，断裂前的应力循环次数越多；当应力降低到某一定值后，曲线与横坐标轴平行，即曲线趋于水平（图 1-10 中 1 曲线），则表示在该应力作用下，材料经无数次应力循环也不会发生断裂。试样承受无数次应力循环或达到规定的循环次数才断裂的最大应力称为材料的疲劳强度。

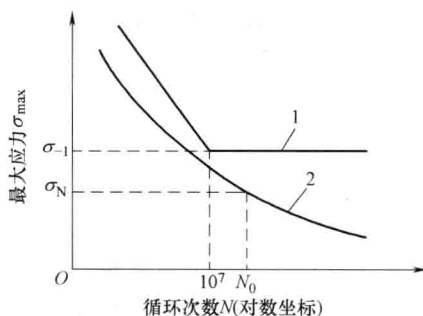


图 1-10 疲劳曲线

对称循环应力的疲劳强度用 σ_{-1} 表示。实践证明，当钢铁材料的应力循环次数达到 10^7 次时，零件仍不断裂，此时的最大应力可作为材料的疲劳强度；非铁金属和某些超高强度钢（图 1-10 中的 2 曲线），当工程上规定应力循环次数为 10^8 次时，所对应的最大应力作为它们的疲劳强度。

疲劳断裂一般是由于材料内部有组织缺陷，如气孔、夹杂物等，或者表面有裂纹、刀痕及其他能引起应力集中的缺陷而导致产生微裂纹，这种裂纹随着应力循环次数的增加而逐渐扩展，最后导致材料断裂。为了提高机械零件的疲劳强度，延长其使用寿命，除改善内部组



织和外部结构形状（如避免尖角），以避免应力集中外，还可以通过降低零件的表面粗糙度值，减少表面刀痕、碰伤和采用各种强化的方法如表面淬火、喷丸处理、涂敷表面涂层来提高疲劳强度。

1.1.7 断裂韧度

有些高强度钢制造的机械零件、构件和中低强度钢制造的大型构件，还有一些非金属材料制造的大型构件，往往在工作应力远低于屈服强度时就发生脆性断裂，这种断裂称为低应力脆性断裂。大量的研究表明，实际材料的组织都不是均匀、各向同性的，一般都存在组织上的缺陷，如微裂纹、夹杂和气孔等，当材料受力时，这些缺陷的尖端附近便产生应力集中现象。根据应力与裂纹扩展的取向不同，裂纹扩展可分为张开型（I型）、滑开型（II型）和撕开型（III型），如图1-11所示。三种裂纹扩展形式以张开型最为危险。一旦形成裂纹后，在其裂纹尖端的应力集中处就形成了应力场。这个应力场的大小程度称为应力强度因子，用符号 K_I 表示。

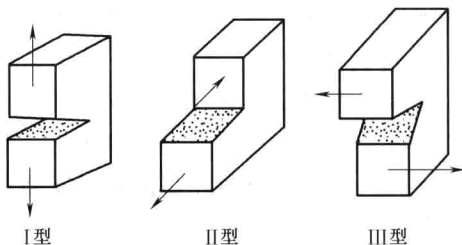


图 1-11 裂纹扩展的基本形式

$$K_I = \gamma \sigma \sqrt{a}$$

式中 K_I ——下角标 I 表示 I 型裂纹应力强度因子 ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)；

γ ——与裂纹形状、加载方式及试样尺寸相关的系数；

σ ——外加应力 (MPa)；

a ——裂纹长度的一半 (m)。

由上式可知， K_I 随 σ 和 a 的增大而增大；在拉伸外力作用下， γ 的值是一定的；当外力逐渐增加或裂纹逐渐扩展时，裂纹尖端的应力强度因子 K_I 也随之增大；当 K_I 增大到某一临界值时，裂纹会突然快速扩展，导致断裂。这个强度因子的临界值称为材料的断裂韧度，用符号 K_{Ic} 表示。

根据应力强度因子 K_I 和断裂韧度 K_{Ic} 的相对大小，可判断存在裂纹的材料在受力时裂纹是否会扩展而导致断裂。当 $K_I \gg K_{Ic}$ 时，材料必然发生裂纹失稳扩展而脆断；当 $K_I < K_{Ic}$ 时，裂纹不扩展或扩展缓慢。

断裂韧度表明材料抵抗裂纹扩展的能力，是断裂力学中重要的性能指标，涉及材料的强度、韧度等，与材料的内部组织、成分和结构密切相关。

1.2 金属材料的高温力学性能

很多机械零件在高温条件下工作，如高压蒸汽锅炉、柴油机、汽轮机等，还有热作模具在工作中既受力的作用又受温度的作用。因此，对于制造这类零件的金属材料，如果仅考虑常温下的力学性能显然是不行的。首先，温度对金属材料的力学性能影响很大，一般随温度升高，其强度降低而塑性增加。其次，金属材料在常温下的静载性能与载荷持续时间关系不大，但在高温下，载荷持续时间对力学性能有很大的影响。在高温长时间载荷的作用下，金属材料的塑性显著降低，缺口敏感性增加，因而高温断裂往往呈脆性破坏现象。