



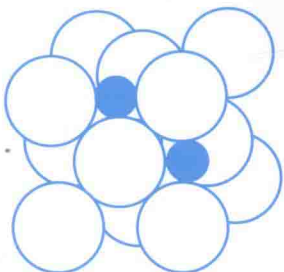
高职高专“十一五”规划教材
GAOZHI GAOZHUAN SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI

机械工程材料

第二版

JIXIE
GONGCHENG
CAILIAO

● 高琪妹 主编
● 叶明生 主审



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

机械工程材料

第二版

高琪妹 主编

叶明生 主审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书在充分汲取高职高专和成人高校培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验和教改实践及成就的基础上修订而成的。

全书分为十二章,其内容包括:金属材料的性能、材料的结构、材料的凝固、金属的塑性变形与再结晶、钢的热处理、非合金钢、低合金钢和合金钢、铸铁、非铁金属及其合金、非金属材料与复合材料、材料的选用、新型材料发展动态。在各章中附以知识目标、能力目标、思考与应用的训练,以强化综合应用能力的培养。适时引入典型实例,引导和培养学生用相关知识解决实际问题的能力,以供读者使用。

本书的内容已制作成用于多媒体教学的 PPT 课件,并将免费提供给采用本书作为教材的院校使用。如有需要,请发电子邮件至 cipedu@163.com 获取,或登陆 www.cipedu.com.cn 免费下载。

本书可作为高职高专机械类或近机类各专业的通用教材,也可作为电视大学、职工大学、函授大学及有关的专业工程技术人员较实用的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械工程材料/高琪妹主编.—2 版.—北京:化学工业出版社,2010.10
高职高专“十一五”规划教材
ISBN 978-7-122-09446-9

I. 机… II. 高… III. 机械制造材料-高等学校:技术学院-教材 IV. TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 173320 号

责任编辑:高 钰
责任校对:边 涛

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 10¼ 字数 252 千字 2011 年 1 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888 (传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址:<http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:20.00 元

版权所有 违者必究

第一版前言

本教材是根据《高职高专教育基础课教学的基本要求》和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》，在充分汲取高职高专探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验、教学实践和教材使用现状的基础上编写而成的。

本书编写的主要特点如下。

1. 在教学内容的组织与安排上，尽可能符合认知规律、教学规律、不求面面俱到，部分内容引而不发，给教学留有余地，学习留有空间。力求简明，重点突出，深入浅出，较合理地处理系统性与实践性、先进性与针对性之间的关系，既注重体系的完整性，又兼顾目前各院校学生及学习者对实际的需求。

2. 以应用型能力培养为主线，全书紧紧抓住材料的化学成分、加工工艺、组织、结构、性能和应用之间的相互关系及其变化规律这个“纲”展开思路，纲举目张。

3. 本课程的性质较之其他课程理论性强，实践应用性广。为了有助于理清学习思路，强化应用，在各章中附以指导性较强的学习指导和趣味性的思考与应用题，以强化综合应用能力的培养。

4. 增加材料学科前沿热点知识和发展动态，以反映时代特色。

5. 全书名词、术语、牌号均采用最新的国家标准，并使用法定计量单位。

本书由高琪妹副教授主编，并编写绪论及第二章、第三章、第六章、第十二章和附录；张雅琴高级讲师编写第一章、第七章、第八章；李明顺高级讲师编写第四章、第五章、第十一章；武斌儒高级讲师编写第九章、第十章。

本书由叶明生副教授主审，他对书稿的内容及文字进行了认真审阅，并提出了许多宝贵的修改意见，参加审稿工作的还有王绍良、赵玉奇、梁正、于宗保等，编者在此表示衷心感谢！本书编写过程中的主要参考书目列于书后，编者向这些著作的作者一并衷心致谢！

由于编者学识有限，不足之处在所难免，敬请广大读者给予指正。

编者
2004.3

第二版前言

本教材是根据《高职高专教育基础课教学的基本要求》和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》，在充分汲取高职高专近年来培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验、教改实践和教材使用现状的基础上修订而成的。

本书编写的主要特点有：在不影响体系相对完整基础上，突出高职院校学生工程意识和实践能力目标的培养。

为了有助于理清学习思路，强化应用，在各章中附以知识目标、能力目标、思考与应用的训练，以强化综合应用能力的培养。

适时引入典型实例，引导和培养学生用相关知识解决实际问题的能力。

增加材料学科前沿热点知识和发展动态，反映时代特色。

本书的内容已制作成用于多媒体教学的 PPT 课件，并将免费提供给采用本书作为教材的院校使用。如有需要，请发电子邮件至 cipedu@163.com 获取，或登陆 www.cipedu.com.cn 免费下载。

本书由高琪妹教授主编并编写绪论、第二、三、六和附录，张雅琴编写第一、七和八章，李明顺编写第四、五和十一章，武斌儒编写第九和十章，王爱民编写第十二章。

本书由徐州工业职业技术学院叶明生教授担当主审，对书稿的内容及文字进行了认真审阅，并提出了许多宝贵的修改意见，编者对此表示衷心的感谢！

由于编者学识有限，不足之处敬请广大读者给予指正。

编者
2010 年 10 月

目 录

绪 论	1
第一章 金属材料的性能	3
第一节 金属的力学性能	3
第二节 金属的工艺性能	11
思考与应用	12
第二章 材料的结构	14
第一节 金属的晶体结构	14
第二节 实际金属的晶体结构	16
第三节 合金的晶体结构	18
思考与应用	19
第三章 材料的凝固	21
第一节 凝固的基本概念	21
第二节 金属的结晶	22
第三节 合金的结晶	25
第四节 铁碳合金相图	28
思考与应用	38
第四章 金属的塑性变形和再结晶	40
第一节 金属的塑性变形	40
第二节 冷塑性变形对金属组织和性能的影响	41
第三节 塑性变形金属在加热时组织和性能的变化	42
第四节 金属的热变形加工	44
思考与应用	45
第五章 钢的热处理	46
第一节 钢在加热时的转变	47
第二节 钢在冷却时的转变	49
第三节 钢的退火与正火	56
第四节 钢的淬火	58
第五节 钢的回火	61
第六节 钢的表面热处理和化学热处理	63
第七节 热处理零件质量分析	66
第八节 热处理技术条件与工序位置排列	68
思考与应用	70
第六章 非合金钢	72
第一节 杂质元素对钢性能的影响	72
第二节 非合金钢的分类	73

第三节	非合金钢的牌号与用途	74
思考与应用		78
第七章	低合金钢和合金钢	80
第一节	合金元素在钢中的作用	80
第二节	低合金钢和合金钢的分类与牌号	82
第三节	低合金钢	84
第四节	合金钢	87
思考与应用		97
第八章	铸铁	99
第一节	铸铁的分类与石墨化	99
第二节	常用铸铁	101
第三节	合金铸铁简介	105
思考与应用		106
第九章	非铁金属及其合金	108
第一节	铝及铝合金	108
第二节	铜及铜合金	112
第三节	钛及钛合金	115
第四节	轴承合金	116
第五节	硬质合金	118
思考与应用		120
第十章	非金属材料及复合材料	122
第一节	高分子材料	122
第二节	陶瓷材料和复合材料	130
思考与应用		132
第十一章	材料的选用	133
第一节	零件的失效形式及失效分析	133
第二节	选材的一般原则和基本方法	134
第三节	典型零件的选材及材料的应用	137
思考与应用		147
第十二章	新型材料发展动态	149
第一节	纳米材料	149
第二节	富勒烯类材料	150
第三节	金属间化合物	151
第四节	储氢材料	151
第五节	新型复合材料的发展	152
思考与应用		154
附录 I	国内外常用钢号对照表	155
附录 II	国内外部分铝及其合金牌号对照表	157
参考文献		158

绪 论

一、材料的发展

人类为了生存和生产,总是不断地探索、寻求制造生产工具的材料,而每一种新材料的研制、开发和应用,都会促使生产力向前发展,并给人们的生活带来巨大的变革,将人类社会及物质文明推向一个新的阶段。所以,历史学家根据材料的使用情况,将人类生活的时代划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代。而今,人类已跨进人工合成材料的新时代,即高分子材料、先进陶瓷材料、复合材料、人工合成材料及即将进入的纳米材料时代。

大约在二三百万年前,我们的祖先用坚硬的容易纵向开裂成薄片的燧石和石英石等天然材料制成石刀、石斧、石锄。到公元前的夏朝,我国就开始使用青铜。从河南安阳晚商遗址出土的司母戊鼎重达 875kg,外形尺寸为 $1.33\text{m} \times 0.78\text{m} \times 1.10\text{m}$,是迄今世界上最古老的大型青铜器,制造时采用了精湛的铸造技术。到公元前的春秋战国时期,开始大量使用铁器。从兴隆战国铁器遗址中发掘出了浇铸农具用的铁模,说明冶金铸造技术已由泥砂造型水平进入铁模铸造的高级阶段。可见我国古代在材料及其加工工艺方面的科学技术曾远远超过同时代的欧洲,在世界上遥遥领先,对世界文明和人类进步做出过巨大的贡献。但是,由于封建制度的长期统治,我国工农业生产和科学技术等在解放前处于落后且停滞状态。

新中国成立以后,我国的钢铁冶炼技术有了突破性的进展,目前钢产量已跃居世界首位。武汉长江大桥使用碳素结构钢制造,而我国自行设计和建造的南京长江大桥则用强度较高的合金结构钢 16Mn 制造,九江长江大桥则用强度更高的合金结构钢 16MnVN 制造。我国的原子弹、氢弹的研制成功,火箭、人造卫星的上天,都以材料的发展为坚实基础。

目前,人们把信息、新材料、能源和生物工程等称为现代科学技术和现代文明的四大支柱,而在这四者之中,新材料又是最重要的基础。历史证明,每一次重大新技术的发明,往往都依赖于新材料的发展。可见材料科学在现代技术中的重要地位和作用。

二、工程材料的分类

材料的种类很多,其中用于机械制造的各种材料,称为机械工程材料。生产中用来制作机械工程结构、零件和工具的机械工程材料,分为金属材料、非金属材料 and 复合材料三大类。

金属材料是最重要的机械工程材料,它包括铁和以铁为基的合金(俗称黑色金属),如钢、铸铁和铁合金等;非铁金属材料(俗称有色金属),如铜及铜合金、铝及铝合金等。钢铁材料应用最广,占整个结构材料、零件材料和工具材料的 90% 左右。

非金属材料是泛指除金属材料和复合材料以外的材料,机械制造中常用的有高分子材料、陶瓷材料等。非金属材料不但能代替部分金属材料,而且已经成为一种重要的、独立的新型工程材料。近年来,非金属材料发展迅速,其中以人工合成高分子材料发展最为突出。

复合材料以其无可比拟的优越性能,站在现代工程材料的前列。复合材料主要包括纤维增强复合材料,层状复合材料和颗粒复合材料三类。可以说,人工复合材料的使用,标志着人类社会的发展已进入了一个崭新的时代。

目前,金属材料、非金属材料和复合材料相互补充、相互结合,已经组成了一个完整的材料体系。

三、课程的性质、内容和基本要求

《机械工程材料》是高职高专机械类专业必修的技术基础课。其教学目的和任务是使学生获得常用机械工程材料的基础知识,为进一步学习其他相关课程和将来从事机械行业生产技术服务奠定必要的理论基础。

本课程的内容主要是金属材料的性能、金属学基本知识、钢的热处理、常用金属材料、非金属材料、复合材料,以及新型材料发展动态等。

学完本课程后,应达到下列的基本要求。

- ① 熟悉常用机械工程材料的成分、加工工艺、组织结构与性能之间的关系及变化规律。
- ② 掌握常用机械工程材料的性能与应用,具有选用常用机械工程材料和改变材料性能方法的初步能力。
- ③ 了解与本课程有关的新材料、新技术、新工艺及其发展动态。
- ④ 根据教学实际情况应适量安排实验课、课堂讨论、课后调研等环节,以利于培养学生分析问题和解决问题的综合能力。
- ⑤ 本课程应安排在金工实习后学习,教材中热处理方法的选择及确定热处理工序位置、工程材料的选用等内容,尚需在有关后续课程、课程设计和毕业设计中反复联系、巩固与提高,从而才能达到基本掌握与应用本课程知识的要求。

第一章 金属材料的性能



知识目标

1. 掌握强度、塑性的概念、拉伸实验方法和步骤。
2. 掌握硬度、冲击韧度和疲劳的概念，了解其测定原理与方法。
3. 了解金属材料工艺性能的含义和种类。



能力目标

1. 能做拉伸实验，并做出力学性能指标的计算结果。
2. 能进行材料布氏、洛氏硬度检测。

为了正确地使用金属材料，应充分了解和掌握金属的性能。金属材料由于其特有的性能特点而被广泛应用。在机械制造行业中，为了设计制造具有较强竞争力的产品，必须了解和掌握材料的各种性能，以便使产品设计、选材和制造等方面体现出最优化。通常把金属材料的性能分为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。金属使用性能包括力学性能、物理性能和化学性能等。了解金属的性能，才能正确、经济、合理地选用金属材料。金属使用性能的优劣，直接与日常生活密切相关。金属材料适应各种冷、热加工的性能，包括铸造性、锻造性、焊接性、热处理性和切削加工性。

第一节 金属的力学性能

金属的力学性能是指金属在力的作用下所显示的与弹性和非弹性反应相关或涉及应力-应变关系的性能，如弹性、强度、硬度、塑性、韧性等。弹性是指物体在外力作用下改变其形状和尺寸，当外力卸除后又恢复到其原始形状和尺寸的特性。物体受外力作用后导致物体内部之间相互作用的力称为内力，而单位面积上的内力则称为应力（MPa）。应变是指由外力所引起的物体原始尺寸或形状的相对变化（%）。

金属力学性能的高低表征金属抵抗各种损害作用的能力大小，它是评定金属材料质量的主要判据，也是金属制件设计时选材和进行强度计算的主要依据。金属力学性能主要有强度、塑性、硬度、韧性和疲劳强度等。

一、强度与塑性

强度是指金属抵抗永久变形和断裂的能力。塑性是指金属在断裂前发生不可逆永久变形的能力。永久变形是指物体在力的作用下产生的形状、尺寸的改变，外力去除后，不能恢复到原来的形状和尺寸。这种不能恢复到原始的形状和尺寸的变形称永久变形或塑性变形。金属材料的强度和塑性指标可以通过拉伸试验测得。

（一）拉伸试验

金属材料的强度和塑性指标可以通过拉伸试验求得。拉伸试验是指用静载荷对试样进行

轴向拉伸，测量载荷和相应的伸长，并测量其力学性能的试验。拉伸时一般将拉伸试样拉至断裂。

1. 拉伸试样

通常采用圆柱形拉伸试样，试样尺寸按国家标准（GB 6397—86）中金属拉伸试验试样中的有关规定进行制作。试样分为短试样和长试样两种，一般采用短试样。光滑圆柱形拉伸试样示意图如图 1-1 所示。图 1-1(a) 为标准试样，图 1-1(b) 为拉伸后的试样。 d_0 为标准试样的原始直径， d_1 为试样断口处的直径。 L_0 为标准试样的标距， L_1 为拉断试样对接后测出的标距。长试样 $L_0=10d_0$ ；短试样 $L_0=5d_0$ 。

2. 试验方法

拉伸试验在拉伸试验机上进行。拉伸试验机示意图如图 1-2 所示。将试样装在试验机的上、下夹头上，开动机器，缓慢加载，在液压轴向力的作用下将试样拉伸，直至拉断为止。同时，记录装置记录下拉伸过程中的力-伸长曲线。

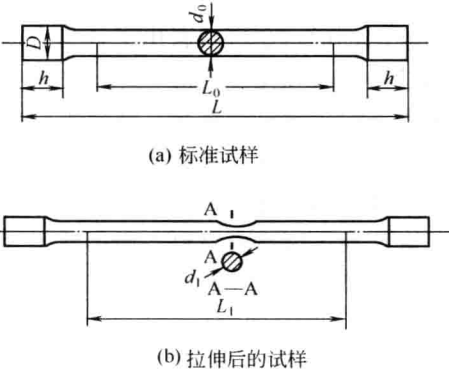


图 1-1 拉伸试样示意

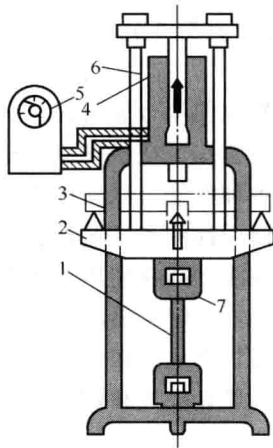


图 1-2 拉伸试验机示意

1—试样；2—工作台；3—立柱；4—工作活塞；
5—表盘；6—拉杆；7—上夹头

(二) 力-伸长曲线

在进行拉伸试验时，载荷 F 和试样伸长量 ΔL 之间的关系曲线，称为力-伸长曲线。通常把载荷 F 作为纵坐标，伸长量 ΔL 作为横坐标，退火低碳钢的力-伸长曲线，如图 1-3 所示。

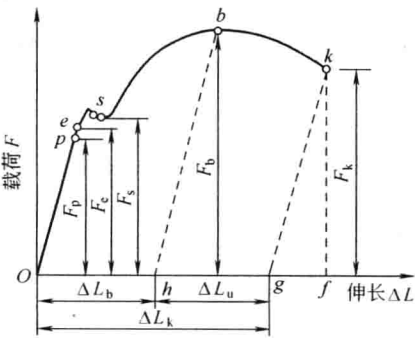


图 1-3 退火低碳钢的力-伸长曲线

观察拉伸试验和力-伸长曲线，将会发现在拉伸试验的开始阶段，试样的伸长量 ΔL 与载荷 F 之间成正比关系，力-伸长曲线 Op 为一条斜直线，即试样与载荷成正比地增加，当去除载荷后试样伸长变形消失，恢复到原来形状，其变形规律符合虎克定律，试样处于弹性变形阶段。载荷在 $F_p \sim F_e$ 之间，试样的伸长量与载荷已不再成正比关系，拉伸曲线不成直线，但试样仍处于弹性变形阶段。

当载荷不断增加，超过 F_e 后，去除载荷，变形不能完全恢复，即有塑性变形产生，塑性伸长将被保留下

来。当载荷继续增加到 F_s 时，力-伸长曲线在 s 点后出现一个平台，即在载荷不再增加的情况下，试样也会明显伸长，这种现象称为屈服现象。载荷 F_s 称为屈服载荷。

当载荷超过屈服载荷后，试样抵抗变形的能力将会增加，此现象为冷变形强化，即抗力增加现象。在力-伸长曲线上表现为一段上升曲线，即随着塑性的增大，试样变形抗力也逐渐增大。

当载荷达到 F_b 时，试样的局部截面开始收缩，产生了颈缩现象。由于颈缩使试样局部截面迅速缩小，最终导致试样被拉断。颈缩现象在力-伸长曲线上表现为一段下降的曲线。 F_b 是试样拉断前能承受的最大载荷，称为极限载荷。

从完整的拉伸试验和力-伸长曲线可以看出，试样从开始拉伸到断裂要经过弹性变形、屈服阶段、变形强化阶段、颈缩与断裂四个阶段。

由于拉伸曲线上的载荷 F 与伸长量 ΔL 不仅与试样的材料有关，还与试样的尺寸有关。为了消除试样尺寸的影响，需采用应力-应变曲线。将试样承受的载荷 F 除以试样的原始截面积 S_0 ，则得到试样所受的应力 σ ，即

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

将试样的伸长量 ΔL 除以试样的原始标距 L_0 ，则得到相对伸长 ϵ ，即

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

分别以 σ 和 ϵ 为纵坐标和横坐标，绘出应力-应变曲线。退火低碳钢的 σ - ϵ 曲线，如图 1-4 所示。

应力-应变曲线的形状与拉伸曲线完全相似，只是坐标与数值不同。但它不受试样尺寸的影响，可以直接看出金属材料的一些力学性能。

(三) 强度指标

强度是指金属材料在载荷作用下，抵抗塑性变形和断裂的能力。金属材料抵抗拉伸变形和破坏的强度指标有屈服点（屈服强度）、规定残余伸长应力、抗拉强度等。

1. 屈服点和规定残余伸长应力

屈服点是指试样在拉伸试验过程中外力不增加（保持恒定）仍然能继续伸长（变形）时的应力。屈服点用符号 σ_s 表示。它是工程技术上重要的力学性能指标之一，也是大多数机械零件选材和设计的依据。屈服点 σ_s 可按下式计算。

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0} \quad (\text{MPa})$$

式中 F_s ——试样屈服时的载荷，N；

S_0 ——试样原始横截面积， mm^2 。

工业上使用的部分金属材料，如高碳钢、铸铁等，在进行拉伸试验时，没有明显的屈服现象，也不会产生颈缩现象，这就需要规定一个相当于屈服点的强度指标，即规定残余伸长应力。

规定残余伸长应力是指试样卸除载荷后，其标距部分的残余伸长达到规定的原始标距百

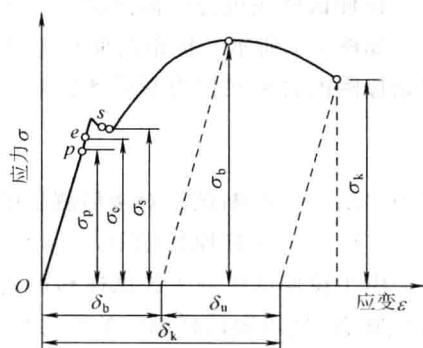


图 1-4 退火低碳钢的 σ - ϵ 曲线

分比时的应力,用应力符号 σ 加角标表示。例如, $\sigma_{r0.2}$ 表示规定残余伸长率为0.2%时的应力。

对大多数零件而言,塑性变形就意味着零件丧失了对尺寸和公差的控制。因此常将 σ_s 或 $\sigma_{0.2}$ 确定为塑性材料的极限应力,作为零件的选材和设计时的依据。

2. 抗拉强度

抗拉强度是指试样拉断前承受的最大应力值,用符号 σ_b 表示,单位为MPa,即

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0} \quad (\text{MPa})$$

式中 F_b ——试样承受的最大载荷, N;

S_0 ——试样原始横截面积, mm^2 。

σ_b 是表征金属材料由均匀塑性变形向局部集中塑性变形过渡的临界值,也是表征材料在静拉伸条件下最大承载能力。对于塑性金属材料来说,拉伸试样在承受最大拉应力 σ_b 之前,变形是均匀一致的。但超过 σ_b 后,金属材料开始出现颈缩现象,即产生集中变形。有些脆性材料,在拉伸试验时 $\sigma_{0.2}$ 也难以测出。因此,用脆性材料制作机器零件或工程构件时,常以 σ_b 作为选材和设计的依据,并选用适当的安全系数。

(四) 塑性指标

金属材料的塑性可以用拉伸试样断裂时的最大相对变形量来表示,如拉伸断裂后的断后伸长率和断面收缩率。它们是工程上广泛使用的表征材料塑性好坏的主要力学性能指标。

1. 断后伸长率

拉伸试样在进行拉伸试验时,在力的作用下产生塑性变形,原始试样中的标距会不断伸长,如图1-1所示。标距的伸长与原始标距的百分比称为伸长率。试样拉断后的标距伸长与原始标距的百分比称为断后伸长率,用符号 δ 表示,即

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

式中 L_1 ——拉断试样对接后测出的标距长度, mm;

L_0 ——试样原始标距, mm。

由于拉伸试样分为长试样和短试样,使用长试样测定的断后伸长率用符号 δ_{10} 表示,通常写成 δ ;使用短试样测定的断后伸长率用符号 δ_5 表示。同一种材料的断后伸长率 δ_{10} 和 δ_5 数值是不相等的,因而不能直接用 δ_5 和 δ_{10} 进行比较。一般短试样 δ_5 值大于长试样 δ_{10} 。

2. 断面收缩率

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

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%$$

式中 S_0 ——试样原始横截面积, mm^2 ;

S_1 ——试样断口处的横截面积, mm^2 。

金属材料塑性的好坏,对零件的加工和使用具有重要的实际意义。塑性好的材料不仅能顺利地进行锻压、轧制等成型工艺,而且在使用时万一超载,由于塑性变形,能避免突然断裂。所以大多数机械零件除要求具有较高的强度外,还必须有一定的塑性。一般说来,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。

二、硬度

硬度是衡量金属材料软硬程度的一种性能指标,也是指金属材料抵抗局部变形,特别是塑性变形、压痕或划痕的能力,是一个综合的物理量。通常,材料的硬度越高,耐磨性越好,故常将硬度值作为衡量材料耐磨性的重要指标之一。

常用的硬度测试方法有布氏硬度(HBS或HBW)、洛氏硬度(HRA、HRB、HRC等)和维氏硬度(HV)。

(一) 布氏硬度

布氏硬度的试验原理是用一定直径 D 的淬火钢球或硬质合金球,以相应的试验力压入试样表面,经规定的保持时间后,去除试验力,测量试样表面的压痕直径 d ,然后根据压痕直径 d 计算其硬度值的方法,如图 1-5 所示。布氏硬度是指球面压痕单位面积上所承受的平均压力表示的硬度值。选择淬火钢球压头时,用符号 HBS;选择硬质合金球压头时,用符号 HBW。布氏硬度值可用下式进行计算。

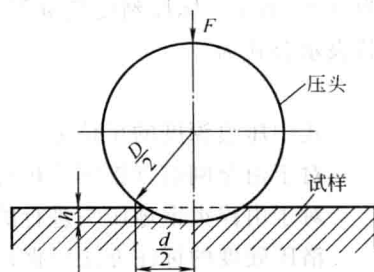


图 1-5 布氏硬度试验原理

$$\text{HBS(HBW)} = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{MPa})$$

式中 F ——试验力, N;

D ——压头直径, mm;

d ——压痕直径, mm。

式中只有 d 是变数,因此,试验时只要测量出压痕直径,即可通过计算或查布氏硬度表得出 HBS(HBW) 值。布氏硬度计算值一般都不标出单位,只写明硬度的数值。

由于金属材料硬软不同,工件厚薄各异,在进行布氏硬度试验时,压头直径、试验力和保持时间应根据被测金属种类和厚度正确地进行选择。

150HBS10/1000/30 表示用直径为 10mm 的淬火钢球,在 1000kgf(9.807kN) 试验力作用下,保持 30s 测得的布氏硬度值为 150;500HBW5/750 表示用直径为 5mm 的硬质合金球,在 750kgf(7.355kN) 试验力作用下保持 10~15s 测得的布氏硬度值为 500,一般试验力保持时间为 10~15s 时不标明。

布氏硬度的特点是测得的硬度值比较准确,数据重复性强,但因压头直径大,材料表面压痕大,不宜测定太小或太薄的试样及成品样。布氏硬度试验常用来测定原材料、半成品及性能不均匀的材料硬度。

(二) 洛氏硬度

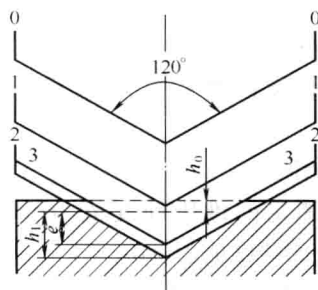


图 1-6 洛氏硬度试验原理

洛氏硬度试验原理是以锥角为 120° 的金刚石圆锥体或直径为 1.588mm 的淬火钢球,压入试样表面。洛氏硬度试验原理如图 1-6 所示。试验时,先加初试验力,然后加主试验力,压入试样表面之后,去除主试验力,在保留初试验力的情况下,根据试样残余压痕深度增量来衡量试样的硬度大小。

在图 1-6 中,0-0 位置为金刚石压头还没有和试样接触时的原始位置。当加上初试验力 F_0 后,压头压入试样中,深度为 h_0 ,处于 1-1 位置。再加主试验力 F_1 ,使压

头又压入试样的深度为 h_1 ，处于 2-2 位置。然后去除主试验力，保持初试验力，压头因材料的弹性恢复在图中 3-3 位置。图中所示 e 值，称为残余压痕深度增量，对于洛氏硬度试验，为 0.002mm。标尺刻度满量程 k 与 e 值之差，称为洛氏硬度值。分为 A、B、C 三个标尺。其表示公式为

$$HR = k - e = k - \text{压痕深度} / 0.002$$

式中压痕深度的单位为 mm。

对于由金刚石圆锥压头进行的试验，其标尺刻度量程为 100，洛氏硬度值为 $100 - e$ 。

对于由淬火钢球压头进行的试验，其标尺刻度量程为 130，洛氏硬度值为 $130 - e$ 。

洛氏硬度的标注方法根据试验时选用的压头类型和试验力大小的不同分别采用不同的标尺进行标注。根据 GB/T 230—1991 规定，硬度数值写在符号的前面，HR 后面写使用的标尺，如 50HRC 表示用“C”标尺测定的洛氏硬度值为 50。

洛氏硬度试验是生产中广泛应用的一种硬度试验方法。其优点是硬度试验压痕小，对试样表面损伤小，常用来直接检验成品或半成品的硬度；可测量高硬度薄层和深层的材料；试验操作简便，可以直接从试验机上显示出硬度值，省去了繁琐的测量、计算和查表等工作。但是，由于压痕小，硬度值的准确性不如布氏硬度，数据重复性差。因此，在测试洛氏硬度时，要选取不同位置的三点测出硬度值，再计算平均值作为被测材料的硬度值。

(三) 维氏硬度

布氏硬度试验不适合测定硬度较高的材料。洛氏硬度试验虽用来测定各种金属材料的硬度，但由于采用了不同的压头、总试验力和标尺，其硬度值之间彼此没有联系，也不能直接互相换算。因此，为了从软到硬对各种金属材料进行连续的硬度标定，人们制定了维氏硬度试验法。

维氏硬度的测定原理，如图 1-7 所示。它与布氏硬度测试原理相似。将夹角为 136° 的正四棱锥体金刚石做成压头，试验时，在规定的试验力 F (49.03~980.7N) 作用下，压入试样表面，经规定保持时间后，去除试验力，则试样表面上压出一个四方锥形的压痕，测量压痕两对角线 d 的平均长度，可计算出其硬度值。维氏硬度是用正四棱锥形压痕单位面积上承受的平均压力表示的硬度值。用符号 HV 表示，计算式如下。

$$HV = 0.1891F/d^2 \quad (\text{MPa})$$

式中 F ——试验力，N；

d ——压痕两条对角线长度的算术平均值，mm。

试验时，用测微计测出压痕的对角线长度，算出两对角线长度的平均值后，查 GB 4340—1984 附表就可得出维氏硬度值。

维氏硬度的测量范围在 5~1 000HV。标注方法与布氏硬度相同。

640HV30 表示用 30kgf(294.2N) 试验力，保持 10~15s 测定的维氏硬度值为 640；640HV30/20 表示用 30kgf(294.2N) 试验力，保持 20s 测定的维氏硬度值为 640。

维氏硬度适用范围宽，从很软到很硬的材料都可以测量，尤其适用于零件表面层硬度的测量，如化学热处理的渗层硬度测量，其测量结果精确可靠。但测取维氏硬度值时，需要测

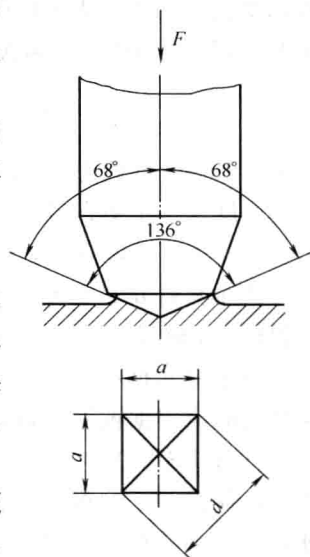


图 1-7 维氏硬度试验原理

量对角线长度，然后查表或计算，而且进行维氏硬度测试时，对试样表面的质量要求高，测量效率较低，因此，维氏硬度没有洛氏硬度使用方便。但维氏硬度不存在压头变形问题；压痕轮廓清晰，采用对角线长度计量，精确可靠，硬度值误差较小。

三、冲击韧度

前面讨论的强度、塑性、硬度等力学性能指标都是在静载荷作用下测定的。但是有些零件在工作过程中受到的是动载荷，如锻锤的锤杆、冲床的冲头等，这些工件除要求具备足够的强度、塑性、硬度外，还应有足够的韧性。韧性是金属材料在断裂前吸收变形能量的能力。动载荷特别是冲击载荷比静载荷的破坏性要大得多，因此，需要制定冲击载荷下的性能指标，即冲击吸收功。为了测定金属材料的冲击吸收功，通常采用夏比冲击试验方法。

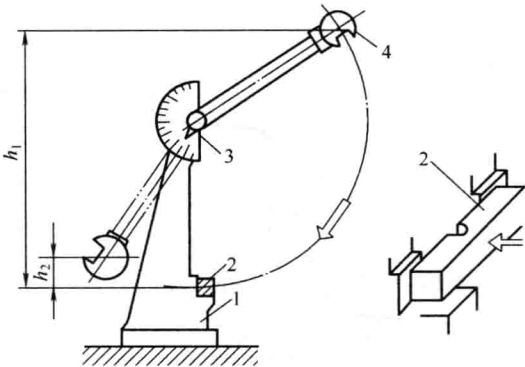


图 1-8 夏比冲击试验原理

1—固定支座；2—带缺口的试样；3—指针；4—摆锤

1. 试验原理

夏比冲击试验是在摆锤式冲击试验机上进行的。试验时，将带有缺口的标准试样安放在试验机的机架上，使试样的缺口位于两支座中间，并背向摆锤的冲击方向，如图1-8所示。将一定质量的摆锤升高到规定高度 h_1 ，则摆锤具有势能 A_{KV1} (V 形缺口试样)。当摆锤落下将试样冲断后，摆锤继续向前升高到 h_2 ，此时摆锤的剩余势能 A_{KV2} 。摆锤冲断试样所失去的势能是

$$A_{KV} = A_{KV1} - A_{KV2} \text{ (J)}$$

A_{KV} 就是规定形状和尺寸的试样在冲击试验力一次作用下折断时所吸收的功，称为冲击吸收功。 A_{KV} 可以从试验机的刻度盘上直接读出。它是表征金属材料冲击韧性的主要判据。冲击试样缺口底部单位横截面积上的冲击吸收功称为冲击韧度，用符号 α_K 表示，

$$\alpha_K = A_K / A \text{ (J/cm}^2\text{)}$$

其中 A 为试样缺口底部横截面积。

显然，冲击吸收功 A_{KV} 越大，表示材料抵抗冲击试验力而不破坏的能力越强。

冲击吸收功是评定金属材料力学性能的重要判据，它代表了材料的冲击韧度高低。冲击韧度对组织缺陷非常敏感，它可灵敏地反映材料质量、宏观缺口和显微组织的差异，能有效地检验金属材料在冶炼、加工、热处理工艺等方面的质量。此外，冲击吸收功对温度非常敏感，通过一系列温度下的冲击试验可测出材料的脆化趋势和韧脆转变温度。

2. 冲击试样

为了使试验结果不受其他因素影响，冲击试样要根据国家标准制作，如图 1-9 所示。带 V 形缺口的试样，称为夏比 V 形缺口试样；带 U 形缺口的试样，称为夏比 U 形缺口试样。使用 U 形缺口试样进行冲击试验时，相应的冲击吸收功用符号 A_{KU} 表示。

3. 冲击吸收功-温度关系曲线

冲击吸收功与试验温度有关。有些材料在室温时并不显示脆性，而在较低温度下，则可能发生脆断。冲击吸收功-温度的关系曲线，如图 1-10 所示。对于具有低温脆性的材料，曲线上具有上平台区、过渡区和下平台区三部分。

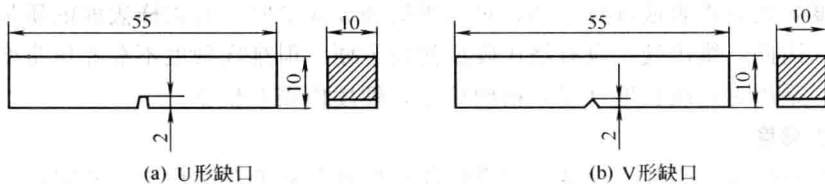


图 1-9 冲击试样

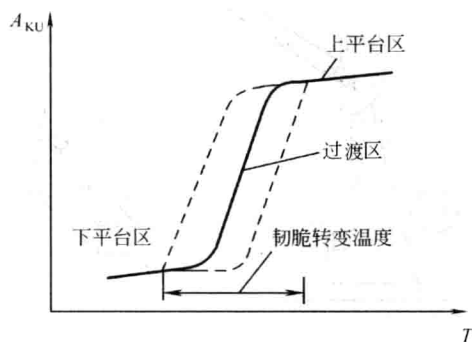


图 1-10 冲击吸收功-温度的关系曲线

在进行不同温度的一系列冲击试验时，随试验温度的降低，冲击吸收功总的变化趋势是随温度降低而降低。当温度降至某一数值时，冲击吸收功急剧下降，钢材由韧性断裂变为脆性断裂，这种现象称为冷脆转变。金属在一系列不同温度的冲击试验中，冲击吸收功急剧变化或断口韧性急剧转变的温度区域，称为韧脆转变温度。韧脆转变温度是衡量金属材料冷脆倾向的指标。材料的韧脆转变温度越低，说明材料的低温抗冲击性越好。非合金钢的韧脆转变温度约为 -20°C ，因此，在较寒冷（低于 -20°C ）地区使用的非合金

钢构件，车辆、桥梁、运输管道等在冬天易发生脆断现象，在选择金属材料时，应考虑其服役条件的最低温度必须高于材料的韧脆转变温度。

四、疲劳

（一）疲劳现象与疲劳曲线

许多机械零件（如轴、齿轮、弹簧等）是在循环应力作用下工作的。循环应力是指应力的方向随时间发生周期性变化的一类应力。常见的对称交变循环应力，如图 1-11 所示。其最大值 $\sigma_{\max}$ 和最小值 $\sigma_{\min}$ 的绝对值相等，即 $\sigma_{\max}/\sigma_{\min} = -1$ 。日常生活和生产中，许多零件工作时承受的应力值通常低于制作材料的屈服点或规定残余伸长应力，但是零件在这种循环载荷作用下，经过一定时间的工作后会发生突然断裂，这种现象称金属的疲劳。

疲劳断裂与静载荷作用下的断裂不同。在疲劳断裂时不产生明显的塑性变形，断裂是突然发生的，因此，具有很大的危险性，常常造成严重的事故。据统计，损坏的机械零件中 80% 以上是因疲劳造成的。因此，研究疲劳现象对于正确使用材料，进行合理设计具有重要的指导意义。

研究表明，疲劳断裂首先是在零件的应力集中局部区域产生，先形成微小的裂纹核心，即裂纹源。随后在循环应力作用下，裂纹继续扩展长大。由于疲劳裂纹不断扩展，使零件的有效工作面逐渐减小，因此，零件所受应力不断增加，当应力超过材料的断裂强度时，则发生疲劳断裂，形成最后断裂区。疲劳断口示意如图 1-12 所示。

（二）疲劳强度

为了防止疲劳断裂，零件设计时不能以 σ_b 、 $\sigma_{0.2}$ 为依据，必须制定出疲劳抗力指标。疲劳抗力指标是由疲劳试验测得的。金属在循环应力作用下能经受无限多次循环而不断裂的最大应力值称为金属的疲劳强度，即循环次数 N 无穷大时所对应的最大应力值，称为疲劳强度。在工程实践中，一般是求疲劳极限，即对应于指定的循环基数下的中值疲劳强度。