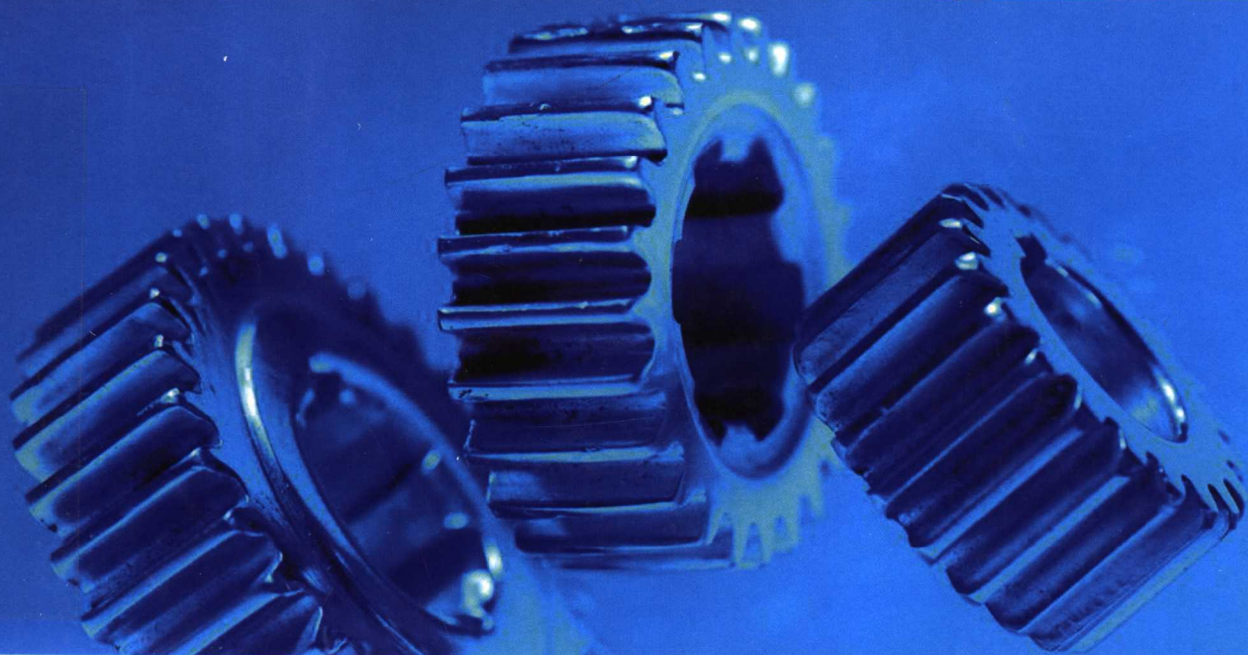




21 世纪高等院校应用型规划教材

工程材料 与机加工概论

主 编 付廷龙 陈 凌
副主编 王 秀 刘荣斌
主 审 张岐生



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

TB3/119

2007

21 世纪高等院校应用型规划教材

工程材料与机加工概论

主 编 付廷龙 陈 凌
副主编 王 秀 刘荣斌
主 审 张岐生

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

内 容 简 介

本书是根据高等院校教学要求编写的,全书共18章,内容主要有工程材料的基础知识、强化方法及其选用;材料成形的基本原理、基础知识、基本工艺方法;切削加工和数控加工的基础知识和基本工艺方法;金属表面处理技术;工程材料在典型机械零件上的应用等。书中大量实例来自生产实际,各章后配有一定数量的复习思考题。书中的有关名词术语、工艺资料等均采用国家最新标准。

本书可作为高等院校、成人高校机械类或近机类各专业教材,亦可作为中专学校相关专业教材和广大工程技术人员的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

工程材料与机加工概论/付廷龙,陈凌主编. —北京:北京理工大学出版社, 2007. 8

ISBN 978-7-5640-1153-6

I. 工… II. ①付…②陈… III. ①工程材料—高等学校—教材②机械加工—高等学校—教材 IV. TB3 TG506

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第129316号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / [http:// www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787毫米×960毫米 1/16

印 张 / 21.5

字 数 / 438千字

版 次 / 2007年8月第1版 2007年8月第1次印刷

印 数 / 1~4000册

定 价 / 36.00元

责任校对 / 张 宏

责任印制 / 吴皓云

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

本书是根据高等院校教育发展的需要而编写的教学用书，以培养高等技术应用人才为目标。本书是我们在从事多年高职教学实践经验的基础上编写而成的。

本书将理论和实训紧密结合，注重联系生产实际和强化应用，突出职业性的特点。做到基本概念清晰，简明扼要，重点突出。对基本理论部分，以必需和够用为原则，以强化应用为重点；对工程材料部分，以掌握材料特性和材料应用为重点；对加工工艺技术部分，以了解和掌握工艺知识为原则，以工艺应用为重点。书中还对金属材料表面处理技术、数控加工作了简要的介绍，其目的是为培养高素质的高技术应用人才奠定必要的工程材料选用和机械制造工艺方面的基础。这对培养学生的工程意识、创新思维、应用基本知识和工艺技术解决工程实际问题的能力，具有重要的作用。

全书系统地阐述了金属材料的性能、金属的晶体结构与结晶、合金的相组成与相图分析、铁碳合金、工业用钢、工业铸铁、非铁金属及其合金、粉末冶金、非金属材料、特殊性能材料、钢的热处理、铸造成形、金属压力加工、金属的焊接、金属切削加工、数控加工、金属材料表面处理技术、机械工程材料选用方面的基本原理和基础知识，每章都有复习思考题。书末还附有碳钢硬度与抗拉强度换算表和压痕直径与布氏硬度对照表。书中所用名词术语、单位、符号等都贯彻了最新国家标准。

全书共 18 章，总课时为 80~100 学时。本书可作为高等院校理工科专业教学用书，也可作为成人高校、夜大、职大、业大、函大相关专业的教学用书和工程技术人员的参考用书。

参加本书编写工作的有李江龙（第 1 章）、王秀讲师（第 2、3、4、11 章）、陈凌副教授（第 5、6、7、8、17 章）、刘荣斌高级工程师（第 9、10、12）、付廷龙高级工程师（第 13、14、15、16、18 章）。全书由付廷龙高级工程师、陈凌副教授担任主编，王秀讲师、刘荣斌高级工程师担任副主编，张岐生教授主审。

本书在编写过程中得到了许多老师宝贵的建议和帮助，在此一并致谢。

限于我们的水平和时间，书中不妥或疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

目 录

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 金属材料的物理、化学性能	17
1.3 金属材料的工艺性能	18
复习思考题	19
第 2 章 金属的晶体结构与结晶	21
2.1 金属的晶体结构	21
2.2 纯金属的结晶	24
2.3 金属的同素异构转变	28
复习思考题	28
第 3 章 合金的相组成与相图分析	30
3.1 合金的组织	30
3.2 合金的相图分析	32
3.3 匀晶相图	34
3.4 共晶相图	36
3.5 共析相图	40
复习思考题	41
第 4 章 铁碳合金	42
4.1 铁碳合金的基本组织	42
4.2 铁碳合金相图分析	46
4.3 典型合金的结晶过程及其组织	50
4.4 碳对铁碳合金组织和性能的影响	56
复习思考题	58

第5章 工业用钢	60
5.1 钢铁生产	60
5.2 钢中常存杂质和合金元素的作用	63
5.3 非合金钢	66
5.4 低合金钢	72
5.5 合金钢	74
复习思考题	88
第6章 工业铸铁	90
6.1 铸铁概述	90
6.2 灰口铸铁	91
6.3 球墨铸铁	94
6.4 蠕墨铸铁	95
6.5 可锻铸铁	96
6.6 合金铸铁	98
复习思考题	99
第7章 非铁金属及其合金	100
7.1 纯铝及其合金	100
7.2 纯铜及铜合金	106
7.3 纯钛及钛合金	110
7.4 轴承合金	112
复习思考题	115
第8章 粉末冶金	116
8.1 粉末冶金的工艺与特点	116
8.2 硬质合金	117
8.3 其他粉末冶金材料	119
复习思考题	120
第9章 非金属材料	121
9.1 高分子合成材料	121
9.2 陶瓷材料	141
9.3 复合材料	143

复习思考题	145
第 10 章 特殊性能材料	146
10.1 热性能材料	147
10.2 电性能材料	151
10.3 磁性能材料	156
10.4 光性能材料	158
10.5 其他特殊性能材料	160
复习思考题	164
第 11 章 钢的热处理	165
11.1 钢在加热时的组织转变	165
11.2 钢在冷却时的组织转变	168
11.3 钢的退火与正火	174
11.4 钢的淬火	176
11.5 钢的回火	181
11.6 钢的表面热处理	183
11.7 热处理新技术及先进工艺简介	187
复习思考题	188
第 12 章 铸造成形	190
12.1 合金的铸造性能	190
12.2 砂型铸造	193
12.3 铸造应力、变形和裂纹	199
12.4 铸件的结构设计简介	200
12.5 铸造工艺图的制定	202
12.6 特种铸造	204
复习思考题	207
第 13 章 金属压力加工	208
13.1 金属的塑性变形	209
13.2 锻造工艺	212
13.3 自由锻工艺过程设计简介	219
13.4 锻件的结构工艺性	220

13.5 板料冲压·····	222
13.6 其他压力加工方法简介·····	225
复习思考题·····	228
第14章 金属的焊接 ·····	229
14.1 焊条电弧焊·····	230
14.2 气焊与气割·····	236
14.3 其他焊接方法·····	239
14.4 常用金属材料的焊接·····	245
14.5 焊接应力与变形·····	247
14.6 焊件的结构工艺性·····	249
复习思考题·····	251
第15章 金属切削加工 ·····	253
15.1 金属切削刀具·····	253
15.2 金属材料的可切削性·····	258
15.3 车削加工·····	260
15.4 铣削加工·····	267
15.5 镗削加工·····	271
15.6 钻削加工·····	272
15.7 刨削加工·····	273
15.8 磨削加工·····	274
复习思考题·····	279
第16章 数控加工简介 ·····	280
16.1 数控机床·····	280
16.2 数控车削加工·····	285
16.3 数控铣床加工·····	287
16.4 加工中心·····	291
16.5 电火花线切割加工·····	294
复习思考题·····	298
第17章 金属表面处理技术简介 ·····	299
17.1 金属表面的防腐处理·····	299

17.2 金属表面强化处理	303
17.3 金属表面装饰加工	304
复习思考题	305
第 18 章 机械工程材料选用	306
18.1 机械零件选材方法	306
18.2 工程材料在汽车上的应用	311
18.3 工程材料在机床上的应用	315
18.4 工程材料在仪器仪表上的应用	319
18.5 工程材料在石油化工设备上的应用	321
18.6 工程材料在航空航天器上的应用	324
复习思考题	326
附录 1 碳钢硬度与抗拉强度换算表	328
附录 2 压痕直径与布氏硬度对照表	329
参考文献	331

绪 论

工程材料与机加工概论是一门有关工程材料性能介绍、机械加工方法和机械零件材料选用的综合性技术基础课。它系统地介绍了机械工程材料的性能、特殊性能材料、各种加工成形方法及其在机械制造中的应用和相互联系、工程材料的选用和在典型机械上的应用等方面的知识。

工程材料的性能包括使用性能和工艺性能两方面。使用性能是材料在使用条件下所具备的性能,主要指力学性能(如强度、塑性、韧性等)、物理性能(如密度、导热性、导电性、磁性等)和化学性能(如氧化性、电化学腐蚀性等);工艺性能是材料在加工过程中所具备的性能,主要指铸造性能、压力加工性能、焊接性能、切削加工性能和热处理性能等。

本教材对机械工程材料的物质结构进行了简明的阐述。在机械工程材料中金属材料仍然是最主要的材料,尤其是钢铁材料在机械工程中仍占首要地位。本书在阐述金属材料使用性能的基础上,结合金属和合金的结构和结晶规律,较详细地介绍了钢铁材料的性能与化学成分、显微组织的关系。在加工方面,主要介绍了铸造工艺、压力加工工艺、焊接工艺、切削加工工艺和热处理工艺等。

工程材料是人类生产和生活的物质基础,它可以直接反映出人类社会的文明程度。人类发展的历史上就有以材料命名的时代,如石器时代、青铜器时代、铁器时代等。在材料的生产和使用方面我们的祖先有过辉煌的成就。商、周时代,青铜冶炼和铸造技术已发展到较高的水平,它们普遍用于制造各种工具、食物器皿和兵器,并能够铸造出 875kg 的司母戊鼎,这种技术到春秋战国时期已达到顶峰。18 世纪后,金属材料成为一个独立的金属学科学体系,产生了最初的金属理论。伴随着金属材料的发展,非金属材料、复合材料也迅速发展起来,弥补了金属材料性能的某些不足。

20 世纪以来,特殊性能材料也在迅速发展,如高温超导材料、激光材料、磁性材料等,促进了机械制造业的飞跃。在机械制造业中,金属材料、非金属材料及复合材料和特殊性能材料构成了完整的工程材料体系。

工程材料与机加工概论是以工程材料,即用于工程结构和机器零件及元器件的材料为研究对象,阐述工程材料的成分、组织、加工工艺和性能之间的关系的学科。工程材料按性能特点和用途分为结构材料和特殊性能材料两类。结构材料是以力学性能为主要使用性能,用于制造工程结构和机器零件的材料;特殊性能材料是以物理、化学性能或生物功能等为主要使用性能,用于制造具有特殊功能的元器件的材料。工程材料包括金属材料、高分子材料、

陶瓷材料和复合材料 4 大类。金属材料是最主要的工程材料,尤其以钢铁材料使用最广,约占 80%。目前虽然高分子材料、陶瓷材料和复合材料在工程结构和机器零件中的应用所占的比例较少,但其发展迅速,尤其是高分子材料的发展,它们将会成为 21 世纪的重要工程材料,并在机械工程中得到广泛的应用。

在机械设计中首先考虑的是材料的力学性能,考虑选用何种材料最佳,使之既经久耐用又经济实惠,同时还要满足零件结构、材料加工工艺性的要求。这就要求设计人员在选材时必须具备两方面的知识:一方面应该了解各种材料的基本特性和应用范围;另一方面应该了解材料性能和设计的关系,必须考虑材料的性能以及结构、加工工艺。只有把两者结合起来才能正确地选用材料。《工程材料与机加工概论》教材正是为适应这一要求而编写的。

学习本课程的目的和任务是了解常用工程材料的性能、材料成形技术和零件加工的基础知识,为学习其他有关课程和今后从事机械设计与制造方面的工作奠定必要的工艺基础。学生在学完本课程后,应达到以下基本要求:

- (1) 掌握常用金属材料的成分、组织、种类、牌号、性能及应用,了解非金属材料的类别、特性和用途。
- (2) 掌握铸造、锻压、焊接、粉末冶金和切削加工的基本原理、加工方法的实质,熟悉其工艺特点、工艺设计的基本知识和应用范围。
- (3) 熟悉金属热处理的基本原理,掌握常用热处理方法及其适用范围。
- (4) 了解零件结构工艺性的基本知识,具有分析零件结构工艺性的初步能力。
- (5) 初步掌握设计零件时选择材料的能力。

第1章

金属材料性能

机械工程材料是现代科学技术的物质基础,金属材料是制造各种机床、机械设备和运输机械等的最主要的材料。金属材料之所以获得广泛的应用,是由于它具有各种优越的性能。生产实践中,往往由于选材不当造成机械设备达不到使用要求或过早失效,因此了解和熟悉材料的性能是合理选材、充分发挥工程材料内在性能潜力的重要保证。

金属材料的性能包含使用性能和工艺性能两方面。使用性能是指金属材料在使用条件下所表现出来的性能,它包括力学性能、物理性能和化学性能等。工艺性能是指金属材料在制造加工过程中反映出来的各种性能,它包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、切削加工性能和热处理工艺性能等。

1.1 金属材料的力学性能

力学性能是指材料在各种外力作用下抵抗变形或破坏的某些能力,是机械制造领域选用金属材料的主要依据,而且它与各种加工工艺也有密切的关系。力学性能范围较广,以试验温度区分,力学性能可分为高温力学性能、常温力学性能和低温力学性能。本书主要介绍常温力学性能。

力学性能包括强度、塑性、硬度、冲击韧性及疲劳强度等。

金属材料在加工及使用过程中所受的外力称为载荷。根据载荷作用性质的不同,对金属材料的力学性能要求也不同。载荷按其作用性质的不同可分为以下3种。

- (1) 静载荷:是指大小不变或变化过程缓慢的载荷。
- (2) 冲击载荷:在短时间内以较高速度作用于零件上的载荷。
- (3) 交变载荷:是指大小、方向或大小和方向随时间作周期性变化的载荷。

机械零件在使用过程或加工过程中,会受到不同形式外力的作用。如柴油机的连杆在工作时不仅受到拉力和压力的作用,还要受冲击力的作用;起重机上的钢丝绳受到悬吊物体的重力作用。根据作用形式的不同,载荷可分为拉伸载荷、压缩载荷、弯曲载荷、剪切载荷和

扭转载荷等，如图 1-1 所示。

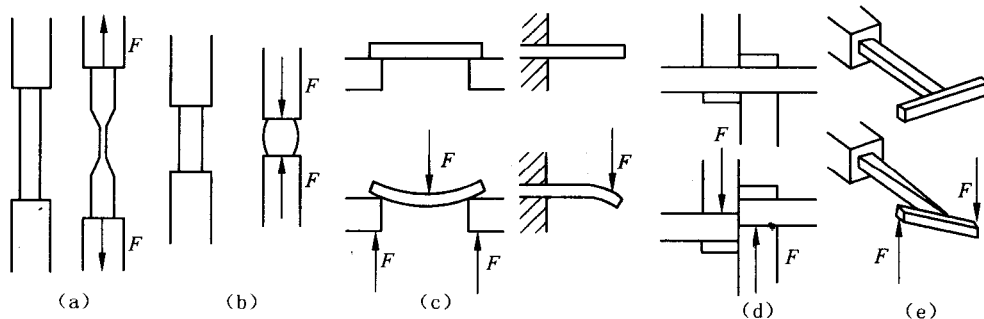


图 1-1 载荷的作用形式

(a) 拉伸载荷；(b) 压缩载荷；(c) 弯曲载荷；(d) 剪切载荷；(e) 扭转载荷

金属材料受到载荷作用后，产生的几何形状和尺寸的变化称为变形。变形分为弹性变形和塑性变形两种。

材料在载荷作用下发生变形，而当载荷卸除后，变形也完全消失。这种随载荷的卸除而消失的变形称为弹性变形。

当作用在材料上的载荷超过某一限度，此时若卸除载荷，大部分变形随之消失（弹性变形部分），但还是留下了不能消失的部分变形。这种不随载荷的去除而消失的变形称为塑性变形，也称为永久变形。

材料受外力作用时，为保持自身形状尺寸不变，在材料内部作用着与外力相对抗的力，称为内力。内力的大小与外力相等，方向则与外力相反，和外力保持平衡。单位面积上的内力称为应力。金属受拉伸载荷或压缩载荷作用时，其横截面积上的应力按下式计算

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1-1)$$

式中： σ ——应力，MPa；

F ——外力，N；

S ——横截面积， mm^2 。

1.1.1 强度指标及应用

金属材料在载荷作用下抵抗塑性变形或断裂的能力称为强度。强度的大小通常用应力来表示，强度愈高，材料所能承受的载荷愈大。

根据载荷作用方式的不同，强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度和抗扭强度 5 种。工程上常以屈服强度和抗拉强度作为强度指标。

抗拉强度是通过拉伸金属试验测定的，通常在拉伸试验机上进行。拉伸试验的方法是用

静拉力对标准试样进行轴向拉伸，同时连续测量力和相应的伸长量，直至试样断裂，根据测得的数据，即可得出有关的力学性能。

1. 拉伸试样

拉伸试样的形状一般有圆形和矩形两类。在国家标准（GB/T 397—1986）中，对试样的形状、尺寸及加工要求均有明确的规定。如图 1-2 所示为圆形拉伸试样。

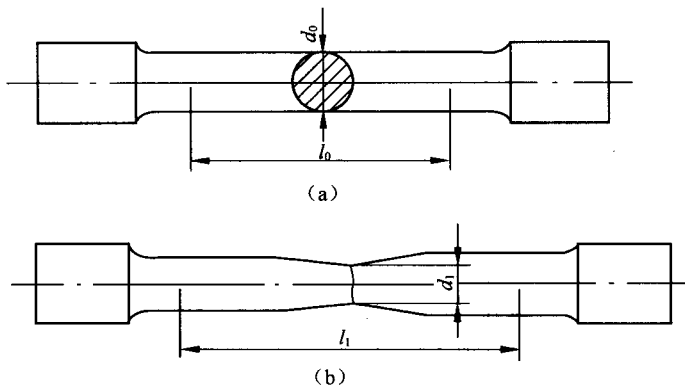


图 1-2 圆形拉伸试样

(a) 拉伸前；(b) 拉伸缩颈断后

图中 d_0 是试样的直径， l_0 为标距长度。根据标距长度与直径之间的关系，试样可分为长试样 ($l_0 = 10d_0$) 和短试样 ($l_0 = 5d_0$) 两种。

2. 力和拉伸曲线

拉伸试验过程中随着载荷的均匀增加，试样不断地由弹性伸长过渡到塑性伸长直至断裂。一般试验机都有自动记录装置，可以把作用在试样上的力和伸长量描绘成拉伸图，也叫做力—伸长曲线。如图 1-3 所示为低碳钢的力—伸长曲线，图中纵坐标表示力 F ，单位为 N；横坐标表示伸长量 Δl ，单位为 mm。图中明显地表现出下面几个变形阶段：

(1) Oe ——弹性变形阶段。当给材料施加载荷后，试样产生伸长变形。试样的变形完全是弹性的，如果载荷卸载，试样可恢复原状。在 p 点以下，载荷和变形量呈线性关系。当施加力超过比例伸长力 F_p 后，力和变形不成线性关系，直至最大弹性伸长力 F_e 。 F_e 为试样能恢复到原始形状和尺寸的最大拉伸力，一般来说 F_p 与 F_e 非常接近。

(2) es ——屈服阶段。当载荷超过 F_e 后再卸载时，试样的伸长只能部分地恢复，而保留了一部分残余变形。当载荷增加到 F_s 时，力—伸长曲线图上出现平台或锯齿状，这种在载荷不增加或略有减小的情况下，试样还继续伸长的现象叫做屈服。 F_s 称为屈服载荷。屈服后，材料开始出现明显的塑性变形，材料完全丧失了抵抗变形的能力。在试样表面开始出现与轴线成约 45° 的滑移线。

(3) sb ——强化阶段。在屈服阶段以后，欲使试样继续伸长，必须不断加载。随着塑性变形的增大，试样变形抗力也在不成比例地逐渐增加，这种现象称为形变强化（或称加工硬化），此阶段试样的变形是均匀发生的。 F_b 为试样拉伸试验时的最大载荷。

(4) bz ——缩颈阶段（局部塑性变形阶段）。当载荷达到最大值 F_b 后，试样的直径发生局部收缩，称为“缩颈”。随着试样缩颈处横截面积的减小，试样变形所需的载荷也随之降低，而变形继续增加，这时伸长主要集中于缩颈部位。当到达 z 点时试样发生断裂。

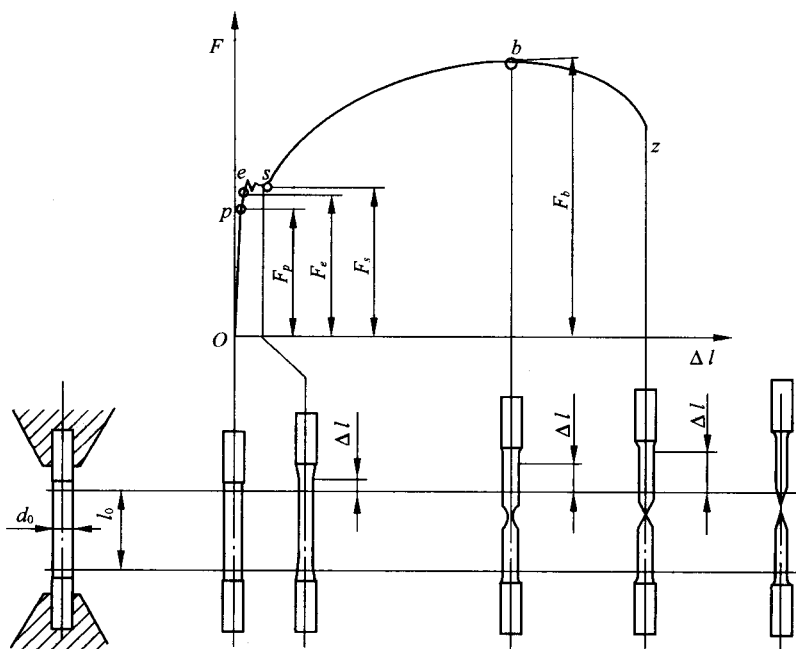


图 1-3 低碳钢的力—伸长曲线

工程上使用的金属材料，并不是都有明显的四个阶段，有的没有明显的屈服现象，如退火的轻金属、退火及调质的合金钢等。有些脆性材料，不仅没有屈服现象，而且也不产生“缩颈”，如铸铁等。图 1-4 为铸铁的力—伸长曲线。

3. 应力—应变

若用试样的原始横截面积 S_0 去除拉力 F ，则得到试样所受的应力 σ ，即

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (1-2)$$

用试样相应的变形量 Δl 除以试样的原始标距长度 l_0 即得其相对变形 ϵ （即应变），即

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1-3)$$

4. 强度指标及其意义

在拉伸的各个阶段，都分别对应典型的应力。常用的强度指标有屈服强度和抗拉强度，应重点掌握。

(1) 屈服强度 σ_s 。

屈服强度是指材料产生屈服时的最小应力。在拉伸试验过程中，载荷不增加（保持恒定），试样仍能继续伸长时的应力称为屈服强度，用符号 σ_s 表示，计算公式如下

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0} \quad (1-4)$$

式中： σ_s ——屈服强度，MPa；

F_s ——试样屈服时的载荷，N；

S_0 ——试样原始横截面积， mm^2 。

工业上使用的许多金属材料，在拉伸试验过程中，没有明显的屈服现象。对于无明显屈服现象的金属材料，按国标 GB/T 228—1987 规定可用规定残余伸长应力 $\sigma_{0.2}$ 表示屈服点。 $\sigma_{0.2}$ 表示试样卸除载荷后，其标距部分的残余伸长率达到 0.2% 时的应力，也称为条件屈服强度。计算公式如下

$$\sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{S_0} \quad (1-5)$$

式中： $\sigma_{0.2}$ ——规定残余伸长应力，MPa；

$F_{0.2}$ ——残余伸长率达 0.2% 时的载荷，N；

S_0 ——试样原始横截面积， mm^2 。

屈服强度 σ_s 和规定残余伸长应力 $\sigma_{0.2}$ 都是衡量金属材料塑性变形抗力的指标。机械零件在工作时如受力过大，则因过量的塑性变形而失效。当零件工作时所受的应力低于材料的屈服强度或规定的残余伸长应力，则不会产生过量的塑性变形。材料的屈服强度或规定的残余伸长应力越高，允许的工作应力也越高，则零件的截面尺寸及自身质量就可以减小。因此，材料的屈服强度或规定的残余伸长应力是机械零件设计的主要依据，也是评定金属材料性能的重要指标。

屈服强度是对组织、成分敏感的性能，可以通过热处理、合金化以及塑性变形等方法在很大范围内变化。提高材料的屈服强度往往是热处理、合金化以及塑性变形的目的之一。

(2) 抗拉强度 σ_b 。

材料在拉断前所能承受的最大载荷与原始截面积之比称为抗拉强度，用符号 σ_b 表示。计算公式如下



图 1-4 铸铁的力—伸长曲线

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0} \quad (1-6)$$

式中： σ_b ——抗拉强度，MPa；

F_b ——试样拉断前承受的最大载荷，N；

S_0 ——试样原始横截面积， mm^2 。

由拉伸图可见，对塑性材料来说，在 F_b 以前试样均匀变形，而在 F_b 以后变形将集中在颈部。强度极限表征材料对最大均匀塑性变形的抗力，它在技术上非常重要，工程上把抗拉强度作为设计时的主要依据之一，也是材料的主要力学性能指标之一。零件在工作中所承受的应力，不允许超过抗拉强度，否则会产生断裂。 σ_b 也是机械零件设计和选材的重要依据。

1.1.2 塑性指标及应用

金属材料在载荷作用下产生塑性变形而不断裂的能力称为塑性。塑性指标也是由拉伸试验测得的，常用伸长率和断面收缩率来表示。

1. 伸长率

试样拉断后，标距的伸长量与原始标距的百分比称为伸长率，用符号 δ 表示。其计算公式如下

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中： δ ——伸长率，%；

l_1 ——试样拉断后的标距，mm；

l_0 ——试样的原始标距，mm。

必须说明，同一材料的试样长短不同，测得的伸长率是不同的。长、短试样的伸长率分别用符号 δ_{10} 和 δ_5 表示，习惯上 δ_{10} 也常写成 δ 。

2. 断面收缩率

试样拉断后，缩颈处横截面积的缩减量与原始横截面积的百分比称为断面收缩率，用符号 ψ 表示。其计算公式如下

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中： ψ ——断面收缩率，%；

S_0 ——试样原始横截面积， mm^2 ；

S_1 ——试样拉断后缩颈处的横截面积， mm^2 。

金属材料的伸长率 (δ) 和断面收缩率 (ψ) 数值越大，表示材料的塑性越好。塑性好的金属可以发生大量塑性变形而不破坏，也易于加工成复杂形状的零件。例如，工业纯铁的 δ