

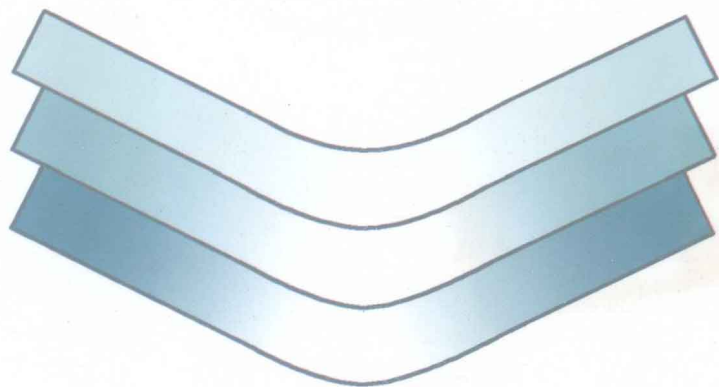


普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

金属材料力学性能

那顺桑 李 杰 艾立群 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

金属材料力学性能

那顺桑 李 杰 艾立群 编著

北 京
冶金工业出版社
2011

内 容 提 要

本书共分 10 章, 内容包括金属在静载荷作用下一系列性能表现及性能指标(第 1~3 章), 材料在冲击载荷作用下的表现——冲击和冷脆(第 6 章), 变动载荷作用下的行为——金属的断裂和断裂韧性(第 4、5 章)、金属的疲劳和磨损特性(第 7、8 章), 金属的高温性能(第 9 章), 以及金属机械强韧化和尺寸因素对力学性能的影响(第 10 章)。

本书可以作为工科院校材料专业的主干课程, 还可以供研究生、工程技术人员和进行常规检验的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料力学性能/那顺桑, 李杰, 艾立群编著. —北京:
冶金工业出版社, 2011. 7

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-5631-3

I. ①金… II. ①那… ②李… ③艾… III. ①金属材料—材料力学性质—高等学校—教材 IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 137279 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjpbs@cnmip.com.cn

责任编辑 杨秋奎 王之光 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5631-3

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2011 年 7 月第 1 版, 2011 年 7 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 14.5 印张; 349 千字; 220 页

29.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

根据教育部高等学校专业目录调整精神，金属材料力学性能是材料类专业必修主干课程。近几十年的科技迅速发展形成了许多新的学科和新的领域，其中金属材料领域的力学冶金就是一个典型的例子。力学冶金是研究金属材料在力和外界因素的联合作用下发生的行为和性态的学科。金属材料力学性能的知识不仅指导金属变形和加工的具体实践，还要研究金属在不同作用力下的行为及其变化规律的基础；材料力学性能既能影响对它的加载方式，同时又需要对材料力学性能指标范围的有效性进行鉴定；根据材料力学性能可以建立金属在外力作用下的行为与外界条件之间的关系，确定材料在不同状态下安全工作的载荷范围。材料性能的知识是设计和开发新的合金材料的重要基础知识，是强化并挖掘材料性能潜力的理论基础。

金属材料力学性能课程讲授给学生材料性能的一般知识和基本概念，奠定材料力学性能的物理本质的理论基础，熟悉力学性能检验的一般方法，培养学生将一般力学性能指标转化为工程问题，建立数据处理的能力、培养利用材料性能的知识解决工程领域中实际问题的能力。

本书计划讲授时间为48~54学时，根据需要可以适当取舍。

本书参考了许多中外书籍和期刊，包凌菲为本书制作了部分插图。向所有被引用的文献的作者表示感谢，向所有为本书提供帮助的人表示感谢。

由于作者水平所限，书中不足和疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编著者

2011年5月

目 录

0 绪论	1
0.1 材料	1
0.2 性能	2
0.3 影响和决定性能的因素	2
1 金属在静载荷下的力学性能	4
1.1 拉伸力-伸长曲线和应力-应变曲线	4
1.1.1 试件形状、拉伸实验	4
1.1.2 拉伸曲线和应力-应变曲线	4
1.1.3 规定非比例伸长应力的测定方法	7
1.1.4 不同材料和不同类型的应力-应变曲线	9
1.2 真实应力-真应变曲线	10
1.3 拉伸试验的相关问题	11
1.3.1 试样的规格、尺寸	11
1.3.2 双向拉伸试验和数据的应用	12
2 金属在其他静载荷下的力学性能	15
2.1 应力状态软性系数	15
2.2 压缩	17
2.2.1 压缩试验的特点	17
2.2.2 压缩试验	17
2.3 弯曲	18
2.3.1 弯曲载荷的作用特点	18
2.3.2 弯曲试验	19
2.4 扭转	20
2.4.1 扭转试验的特点	20
2.4.2 扭转试验	21
2.5 切口试样静载荷试验	22
2.5.1 切口效应	22
2.5.2 切口试样静拉伸试验	24
2.6 硬度	25

2.6.1	金属硬度的意义及硬度试验的特点	25
2.6.2	硬度试验	26
3	金属的变形	36
3.1	弹性变形	36
3.1.1	弹性变形的特点	36
3.1.2	虎克定律	37
3.1.3	弹性常数和弹性模量	39
3.1.4	弹性比功	42
3.1.5	弹性不完善性	43
3.2	塑性变形	47
3.2.1	塑性变形的方式和特点	47
3.2.2	屈服现象和屈服点	49
3.2.3	屈服强度的影响因素及提高屈服强度的途径	52
3.2.4	形变强化(应变硬化)	57
3.2.5	缩颈现象和抗拉强度	59
4	金属的断裂	61
4.1	脆性断裂类型和断口特征	62
4.1.1	沿晶断裂	62
4.1.2	脆性穿晶断裂	63
4.1.3	解理断裂	63
4.1.4	准解理断裂	64
4.1.5	正断型和切断型断裂	65
4.2	解理断裂机理	65
4.2.1	裂纹的形成	65
4.2.2	裂纹的扩展	69
4.2.3	微观断口特征	70
4.3	韧性断裂	71
4.3.1	韧性断裂的普遍特征	71
4.3.2	微孔的成核和长大	72
4.3.3	微观断口特征	74
4.4	断裂强度理论	74
4.4.1	理论断裂强度	74
4.4.2	断裂强度的裂纹理论	75
5	金属的断裂韧度	78
5.1	线弹性条件下的金属断裂韧度	79

5.1.1	裂纹扩展的基本形式	79
5.1.2	应力场强度因子 K_I 及断裂韧度 K_{IC}	80
5.1.3	裂纹扩展能量释放率 G_I 及断裂韧度 G_{IC}	90
5.2	影响断裂韧度 K_{IC} 的因素	92
5.2.1	断裂韧度 K_{IC} 与常规力学性能指标之间的关系	92
5.2.2	影响断裂韧度 K_{IC} 的因素	93
5.3	弹塑性条件下金属断裂韧度的基本概念	96
5.3.1	J 积分及断裂韧度 J_{IC}	96
5.3.2	裂纹尖端张开位移及断裂韧度 δ_c	98
6	钢的冷脆及冲击韧性	101
6.1	静力韧性	101
6.1.1	静力韧性的概念	101
6.1.2	静力韧性的应用和局限性	102
6.2	冲击试验和冲击韧性	102
6.2.1	冲击载荷特征与形变速率	102
6.2.2	冲击载荷对弹性变形的影响	103
6.2.3	冲击载荷对塑性变形和断裂的影响	103
6.2.4	静力和冲击作用应力的区别与冲击韧性的含义	103
6.2.5	冲击试验	105
6.3	低温脆性(钢的冷脆)	107
6.3.1	低温脆性现象	107
6.3.2	低温脆性的本质	107
6.3.3	低温脆性的影响因素	108
6.4	低温脆性的评定方法	113
6.4.1	韧脆转变温度 T_c 及低温脆性	113
6.4.2	能量法定义 T_c	113
6.4.3	断口形貌定义 T_c	114
6.4.4	落锤试验法	114
6.4.5	动态撕裂试验法	115
6.4.6	其他低温脆性评定规范	117
7	金属的疲劳	119
7.1	引言	119
7.2	疲劳载荷的分类与常用概念	120
7.2.1	疲劳载荷的分类	120
7.2.2	疲劳载荷的常用概念	121
7.3	材料的疲劳试验与疲劳曲线	122

IV	
7.3.1	疲劳试验类型及其装置 122
7.3.2	疲劳试验 123
7.3.3	疲劳试验结果的统计处理及 $P-S-N$ 曲线的绘制 127
7.3.4	疲劳试样及其制备 129
7.4	疲劳抗力指标 130
7.4.1	疲劳强度 130
7.4.2	疲劳寿命 131
7.4.3	存活率 131
7.4.4	过负荷损害界和过负荷持久值 131
7.4.5	非对称循环的疲劳抗力 132
7.5	疲劳强度的影响因素 134
7.5.1	切口效应和切口敏感度 134
7.5.2	零件尺寸效应 136
7.5.3	变动载荷频率范围的影响 137
7.5.4	表面状况的影响 137
7.5.5	平均应力的影响 138
7.5.6	合金成分及显微组织的影响 139
7.5.7	使用温度的影响 139
7.5.8	环境介质的影响 140
7.5.9	表层残余应力对疲劳强度的影响 140
7.6	疲劳强度与材料基础力学性能之间的关系 140
7.6.1	疲劳强度和抗拉强度之间的经验关系 141
7.6.2	疲劳宏观因子和常规力学性能的关系 141
7.7	疲劳机理 142
7.7.1	裂纹的萌生 142
7.7.2	疲劳过程的硬化和软化 143
7.7.3	疲劳裂纹的扩展 143
7.8	疲劳强度设计 144
7.8.1	无限寿命设计法 145
7.8.2	有限寿命设计法 146
7.8.3	复合应力下的疲劳强度设计 149
7.9	疲劳裂纹扩展速率 da/dN 及其测试 150
7.9.1	疲劳裂纹速率测定试样及制备方法 151
7.9.2	试验程序 152
7.9.3	试验结果的处理和计算 153
7.10	其他形式的疲劳 155
7.10.1	低周疲劳 155
7.10.2	多次冲击抗力(冲击疲劳) 156

7.10.3 热疲劳	158
8 金属的磨损和接触疲劳	160
8.1 磨损及磨损类型	160
8.1.1 磨损的概念	160
8.1.2 耐磨性的表示	161
8.2 磨损模型和磨损机理	161
8.2.1 粘着磨损	162
8.2.2 磨粒磨损	165
8.2.3 冲蚀磨损	171
8.2.4 腐蚀磨损	174
8.2.5 微动磨损	174
8.3 常用磨损试验方法	175
8.4 金属的接触疲劳	176
8.4.1 接触疲劳现象与接触应力	176
8.4.2 接触疲劳破坏机理	179
8.4.3 接触疲劳试验方法	181
8.4.4 影响接触疲劳寿命的因素	181
9 金属的高温力学性能	184
9.1 金属的蠕变与蠕变断裂	185
9.1.1 蠕变现象	185
9.1.2 蠕变过程中变形与断裂机理	186
9.2 蠕变极限与持久强度	188
9.2.1 蠕变极限及其测定方法	188
9.2.2 持久强度及其测定方法	189
9.2.3 影响蠕变极限及持久强度的主要因素	191
9.3 松弛稳定性	192
9.3.1 金属中的应力松弛现象	192
9.3.2 松弛稳定性指标及其测定方法	193
9.4 其他高温力学性能	195
9.4.1 高温短时拉伸性能	195
9.4.2 高温硬度	195
10 材料的机械强韧化	196
10.1 机械强韧化的内容、意义	196
10.1.1 材料的切口效应和应力集中	197
10.1.2 切口强化	202

10.1.3 尺寸效应和加工各向异性	204
10.2 界面结构和力学性能	206
10.2.1 表面和界面	206
10.2.2 界面类型和结构	207
10.2.3 界面强化作用	208
10.3 结构强化	209
10.4 材料的非工作方向性能及其强韧化问题	211
10.4.1 锥锻试验	212
10.4.2 剪切试验	214
附录	218
参考文献	220

0 绪 论

0.1 材 料

不同学科的科学对于物质的分类方法不同。材料工作者将人类自身周围的物质分为能源和材料两大类。能源指的是以能量或财富的形式被我们利用或者占有的物质，以（在大多数情况下）“能量”的形式为我们服务的。例如森林、海洋、煤炭、阳光、空气等，森林产生大量的氧气供人类呼吸得到能量，煤炭直接燃烧、或者制成焦炭、或者制成煤气都是以能量的形式被我们利用。材料指的是以构件或者制作构件的原料的形式被我们利用或者占有的物质。这两个定义在不同的条件下也可以互相转化：森林中的一棵树被伐下来就可以成为制作木器的原料——材料。如果木材被加工成纸张，纸张被加工成钞票，又变成财富被我们占有或者流通。当然两者之间也没有截然的分界，因为，材料理所当然也是资（能）源。早期人们经常说“能源、材料和信息是人类社会赖以生存的三大支柱”，说的就是作为统治世界的高级动物——人类所具有的一切就是物质和思维。

材料可以分为金属材料、无机非金属材料、高分子材料三大类。

(1) 金属材料是指以金属键结合为主的，宏观上具有明显塑性变形能力的一类材料，如黑色、有色和特种金属材料等。

(2) 无机非金属材料则是以共价键、离子键为主要结合特征，大体积无机非金属材料基本上不具备显著塑性变形能力，如陶瓷、玻璃、水泥和耐火材料等。

(3) 高分子材料指的是以分子键作为主要结合特征，宏观具有大量弹性变形能力的一类材料，如塑料、橡胶、纤维等。

还有许多其他分类方法，但是这种分类方法概念严密、简洁通俗、方便实用。在有些文献中在上述三大类材料分类的基础上增加了一个复合材料，在这样的分类中复合材料不能视作另一类材料。此外，我们将钟表按生产地分为瑞士表、日本表、国产表等，按形式分为手表、怀表、挂钟、座钟等，但是我们不说“钟表分为瑞士表、日本表、石英表等”，因为这是概念的混淆。

材料在人类社会发展中始终占有特别重要的地位。人类社会发展的历史阶段就是以所使用的材料来划分的，如石器时代、陶器时代、青铜器时代铁器时代等。材料科技的水平和材料应用的先进程度是一个国家发展水平的显著标志。每一种新材料的发明和应用，都将人类的能力向新的高度扩展，给社会进步带来明显的促进和给人民生活带来明显的改善。材料对社会发展的作用和重要性任何时候都不可替代。随着科学技术的不断发展，材料领域仍然面临蓬勃向上的发展机遇。通过人们不断的努力，材料的性能逐步得到提高，材料的应用领域越来越广泛，材料的潜在能力发挥得越来越充分。

材料科学领域内有人类永恒的研究课题。

0.2 性 能

性能一词在这里具有性质、行为、特征、性能这样一些含义。性能这个词同样具有既表示被讨论的体系具有的本质方面的特征，又包括在一系列人为限定条件下通过规范化的程序得到的指标（这些指标可能仅仅是一组数据）。材料的性能是一种参量，是材料本质在一定条件下的客观反映。我们用材料性能指标表征材料在给定外界条件下的行为。

性能是个广泛的课题，有人把材料性能归属于“性能学”，从原理上讲是应该的，但是工程应用的复杂性说明，“性能学”这样的学科没有办法把各种特殊性能放在一起讨论。

人类认识材料就是从性能上认识的。所以性能是甄别和区分不同材料的尺度，选择和应用不同材料的规范，生产和制造各种材料的标准，验收和评价各种材料的依据。

可以说，人类在材料领域所做一切努力的目的都是为了改善或提高材料的性能。

从理论上讲，材料的性能可以分为工艺性能和使用性能，这样的划分主要是出于从生产制造和使用两个角度，理解起来方便。所谓的工艺性能指的是材料的可加工制作性或者被加工制作特性，如铸造性能、切削加工性能、焊接性能、热处理性能、塑性成型性能等。而使用性能则是材料或者被制作成零部件的材料在服役过程中表现出来的一系列特性和性能，如强度、塑性、韧性、耐磨性等物理、化学和力学性能。当然很多工艺性能的特征都用到使用性能的指标。在很多情况下我们更注重和提倡的是材料成为各种零部件以后的服役性能。当然，由于可加工性能不满足成本要求时也会成为材料被否定的主要因素。还有其他分类方法，如：简单性能（物理性能、力学性能和化学性能），复杂性能（复合性能、工艺性能和使用性能）。

在某种意义上说，把材料性能分为试验性能和工程性能两大类，可能更合适一些。所谓试验性能是指用规范的试样（规格一定、形状一定、尺寸一定或者彼此之间完全可以进行比较和替换）、按照规范的操作规程（按照国家标准、国际标准、企业标准或者行业标准、用给定的加载速度、加载方式等）、用特定的设备（能够实现标准要求的试验条件）在一定的环境条件（温度、湿度等条件）下测定出来的试样的某项性能指标，如强度、冲击韧性等。工程性能则是在千差万别的工况条件下零部件在实际工作过程中该项性能相关的表现情况。两者之间有直接的联系又有重大的区别。这里确实存在把试验性能转化为工程性能的必要性和迫切性，而且对于大多数初学者来讲这可能是更重要的。这是说，试验性能的局限性比较大，离实际工作条件有一定差别或者差别大，忽略和简化的因素比较多。把试验性能指标应用于实践环节的时候需要具备一定的实践经验和知识能力对其加以修正。

0.3 影响和决定性能的因素

材料的性能取决于很多因素，同时材料的性能也是决定零部件使用寿命的关键因素。

材料在人类生活中起到作用的关联可以用材料科学与工程因素的四面体表示，如图 0-1 所示。

(1) 第一个因素，“成分/结构”这个内在因素包括下列内容：

1) 成分，具有组成材料的元素种类、元素之间的配合（搭配）及各元素的含量三个方面的含义；对每一个具体元素而言，在材料中的作用可以认为是影响性能的一维信息，这个一维信息的作用可以是线性的，也可以是非线性的。

2) 这里说的结构通常包含内部组织和晶体结构两个因素。材料的内部组织是我们在各种不同条件下观察到的材料表面（或内表面）的形貌（可以是肉眼观察的，可以是普通显微镜在不大的放大倍数下观察的，更可以是透射电子显微镜、扫描电子显微镜以及原子力显微镜下观察到的极细微的形貌），这个因素在非金属材料中不十分显著，在金属材料中非常重要。组织可以认为是材料内部影响性能的二维信息。材料的结构是指组成材料的原子在材料内部三维方向上的排列方式和规律性（即金属材料的晶体结构），以及由于不同的原因形成的各种结构缺陷（晶体中的点缺陷、线缺陷和面缺陷）。所以结构是材料内部影响性能的立体的三维信息。这里的一、二、三维信息，既是影响性能的因素，又是材料零部件工作寿命的影响因素。

(2) 第二个因素，合成/加工是指实现特定原子排列（组织或结构）的获得和演变过程及特定形状尺寸的获得过程，在这个过程中材料内部的组织、结构和性能都可能在发生变化。

(3) 第三个因素，性质/性能是指对材料功能特性和效用（如电、磁、光、热、力学等性质）的定量度量和描述，可以认为是材料特征表现和工作寿命的多维信息。

(4) 第四个因素，使用效能是指材料性质在使用条件（如受力状态、气氛、介质与温度等）下的表现和服役寿命。

如同这个四面体所表示，材料性能和寿命的影响因素是非常复杂的，是以上四个方面共同作用的结果。第一个因素可以认为是内因，不能改变或者不容易改变。其余的三个是外因，可以改变工艺、加工条件、加工温度、改变形状、改善零部件工作条件 and 环境因素。

我们学习力学性能的目的是为了全面了解材料的特性、熟悉这些特性作为性能指标的检测方法和试验性能与工程应用之间的一般关系。

在了解材料服役寿命的影响因素的基础上，我们不仅想方设法提高或挖掘材料性能潜力而且还应该想方设法“改善”材料或零部件的“工作环境”，这是学习材料力学性能课程的重要目的。

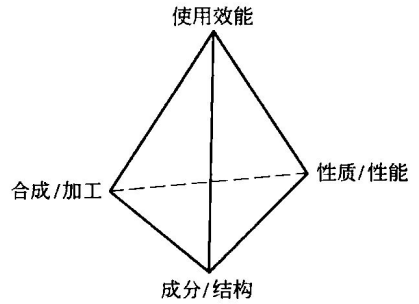


图 0-1 材料科学与工程的基本要素

1 金属在静载荷下的力学性能

本章介绍金属在静载荷单向拉伸状态下的力学行为，包括弹性形变、塑性形变和断裂。

所谓静载荷是指施加在试样上的载荷变化速度非常缓慢，试样上的变化足以精确的测量和记录，试样只因载荷的原因而发生变化，而不因载荷速度的变化而变化。

重点介绍表征这些力学行为的性能指标、测试方法，以及力学行为的物理意义。

1.1 拉伸力-伸长曲线和应力-应变曲线

1.1.1 试件形状、拉伸实验

金属在单向、双向、三向应力条件下，力学性能差别很大，单向应力条件下测得的指标比较稳定，数据具有广泛的可比性。各国都广泛使用而且各国的国标都有严格的规定。

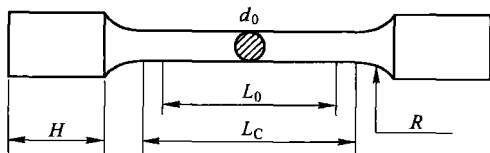


图 1-1 拉伸用的圆柱试样的规格

拉伸试验一般采用光滑的圆柱或板状（横截面为长方形）试件，试件尺寸在国家标准《室温拉伸试验方法》（GB228—2002）中有明确的规定。以圆柱试件为例，其结构如图 1-1 所示（试样上存在的切口和裂纹都会导致受双向、三向应力状态，因而改变单向受力状态）。

光滑试件由三个部分组成：工作部分长度 L_0 （也称为标距长度）、工作部分直径 d_0 、过渡部分圆角半径 R （拉伸时会产生应力集中，处理不好会在此断裂）。夹持部分 H （保证把载荷正确的加到工作部分，此部分长度不做要求）。

《室温拉伸试验方法》（GB228—2002）中规定了试样截取的取向、部位、各种尺寸精度、试样各部位的表面粗糙度。

由拉伸实验机拉伸试件，由附加仪器记录拉伸力 F 及其对应的试件标距间长度的绝对伸长量 ΔL 。以 F 为纵坐标， ΔL 为横坐标，做出的 $F-\Delta L$ 曲线，称为拉伸力-伸长曲线，也称为拉伸图（曲线）。

1.1.2 拉伸曲线和应力-应变曲线

拉伸试验是现场应用最多的试验方法。各种金属和绝大多数非金属材料普遍采用的试验方法。

拉伸试验的基本出发点是给材料施加单向作用力，测定在单一作用力情况下材料具有的一系列性能指标，因此试样截面必须能够实现试验过程中试样承受单向加载作用力。由

于试样是具有均匀截面积，试样承受的载荷除以试样的截面积称为试样承受的应力〔由于最新拉伸试验的国家标准将屈服强度、抗拉强度等用 $R_{0.2}$ 、 R_m （旧国家标准分别表示为 $\sigma_{0.2}$ 、 σ_s 和 σ_b ）符号表示，而其他标准如疲劳试验等还是采用 σ 表示应力，所以应力和强度表示在本章中两种方法同时应用〕，即单位面积上作用的力。以后我们还把它称为工程应力。

我们用一组数据说明材料的拉伸试验的意义及材料强度特性。

将直径 12.8mm，长度 50.8mm 的铝合金圆柱体试样的两头夹持在能够轴向均匀移动的夹头之间，施加轴向张力作用，并在不同的作用力水平时记录试样发生的长度变化以及对计算试样中的应力、应变，试验结果汇总在表 1-1 中。

表 1-1 铝合金圆柱体试样拉伸数据

载荷/N	伸长量/mm	计算值		载荷/N	伸长量/mm	计算值	
		应力/MPa	应变			应力/MPa	应变
0	0	0	0	33360	0.762	258.6	0.015
4448	0.0254	34.47	0.0005	35139.2	2.032	272.3	0.04
13344	0.0762	103.4	0.0015	35584 (最大载荷)	3.048	275.8	0.06
22240	0.127	172.4	0.0025	35361.6	4.064	273.7	0.08
31136	0.178	241.3	0.0035	33804.8 (断裂)	5.027	262	0.1025

这些数据作成曲线，就有图 1-2 的形式，称为应力（载荷除以试样原始截面积作为纵坐标）-应变（试样伸长量除以原始标距长度作为横坐标）曲线。曲线上可以定义若干性能指标：例如弹性极限（规定非比例伸长应力 = 规定非比例延伸强度）、抗拉强度、断裂强度、屈服强度以及操作精确的时候我们可以直接测量材料的弹性模量。当然这些数据的计算有一个基本条件：那就是将施加在试样上的外力除以试样原始截面积 A_0 。

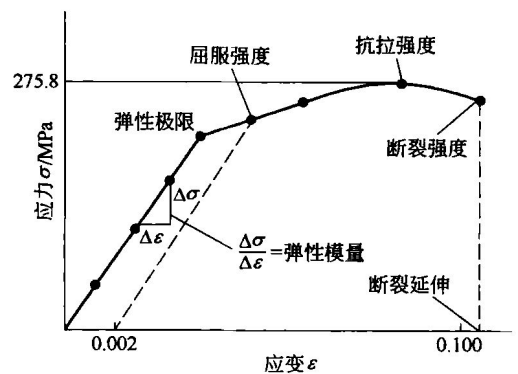


图 1-2 根据表 1-1 的数据绘制的应力-应变曲线

上述的那些应力是用下面的这些公式计算出来的：

$$\text{工程应力} \quad \sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1-1)$$

$$\text{真应力} \quad S = \frac{F}{A} \quad (1-2)$$

工程应变：

$$\text{延伸率} \quad \delta = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\% \quad (\text{国家新标准表示符号 } A\%) \quad (1-3)$$

$$\text{断面收缩率 } \Psi = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\% \quad (\text{国家新标准表示符号 } Z\%) \quad (1-4)$$

式(1-1)所表示的工程应力可以采用不同变形程度的应力与原始截面积的比值来分别表征具有不同意义的临界应力。

这些应力分别有：规定非比例伸长应力（残余应变偏离比例应变达到0.005%的应力）；相应的还可以有 $R_{0.01}$ 、 $R_{0.005}$ 等根据不同的残余应变可以对应过去的比例极限、弹性极限或者屈服极限等项指标（图1-3）。

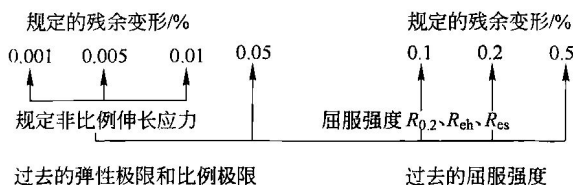


图 1-3 不同的规定残余变形与对应的强度指标关系

$$R_{0.005} = \frac{F_{0.005}}{A_0} \quad (1-5)$$

像低碳钢这样的材料会出现图 1-4 那样的拉伸曲线，其屈服变形明显，出现在 h 点之后，应力不增加的情况下变形继续增加的情况，图 1-4 的 h 点和 s 点，分别称为上屈服点和下屈服点。

$$\text{上屈服点应力: } R_{eh} = \frac{F_h}{A_0} \quad (1-6)$$

$$\text{下屈服点应力: } R_{es} = \frac{F_s}{A_0} \quad (1-7)$$

这些表达式中的符号的意义如图 1-5 所示。

选取适当尺寸的试样，或者加工成规定尺寸的试样，在能够施加轴向载荷的设备上进行轴向拉伸，这样的试验称为拉伸试验。这样的试样，在比较细的线材、棒材上直接按原

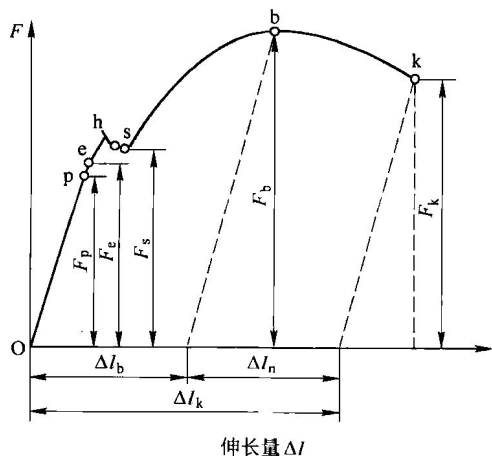


图 1-4 低碳钢的拉伸曲线

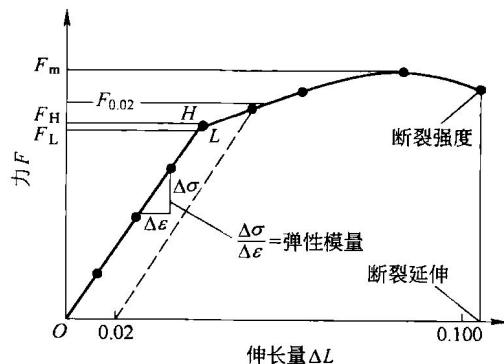


图 1-5 得到各种不同性能指标

始直径截取试样，原料比较粗大时加工成规定尺寸的试样。

下面结合低碳钢拉伸曲线（图 1-4）说明各个不同载荷的物理意义。

F_p 比例极限载荷：试样伸长随载荷成正比，保持直线关系的最大载荷。

F_e 弹性极限载荷：开始产生微量塑性变形的载荷。 F_e 与 F_p 很接近。

F_s 屈服：拉伸曲线上出现平台或锯齿，这种载荷不增加或减少的情况下，继续伸长的现象称为屈服（屈服后金属开始明显塑性变形，试样表面出现滑移带）。

形变强化：屈服后继续变形，须不断增加载荷。随着塑变的增大，抗力不断增大的现象为形变强化（加工硬化）。

F_b 强度极限载荷：拉伸曲线上最大载荷的强度极限的载荷。

集中塑性变形：载荷达到最大值 F_b 后，在试样某部位截面开始急剧缩小，出现了“缩颈”，以后的变形主要集中在缩颈附近。

F_k 断裂载荷：一般金属材料都有弹性变形阶段，而其他部分可能有可能无。弹性与塑性之间没有绝对的分界点。

对应与这些载荷，过去称为比例极限、弹性极限、甚至屈服极限等指标可以参照式 (1-5) 表示为 $R_{p0.001}$ 、 $R_{p0.005}$ 或者 $R_{e0.01}$ 、 $R_{0.2}$ 等。下角标 p、e 分别表示“比例”、“弹性”之意。

σ_b (R_m) 抗拉强度（五大力学性能指标之一），同样参照式 (1-8) 计算得到。它在拉伸曲线上是均匀塑变和集中塑变的分界点，是材料能承受的最大拉应力，是工程设计、材料研究、材料选择的主要依据之一。

$$R_m = \frac{F_m}{A_0} \quad (1-8)$$

断裂强度： S_k 是指断裂载荷除以试样断裂处的截面积得到。

1.1.3 规定非比例伸长应力的测定方法

在新的国家标准中将过去很多（诸如比例极限、弹性极限、甚至屈服极限）强度指标，转化为“规定非比例伸长应力（延伸强度）”，其对应的残余变形范围如图 1-3 所示。

规定非比例伸长应力的测定方法，在国家标准中做了详细的规定，下面介绍两种测定方法。

1.1.3.1 拉伸试验确定“规定非比例伸长应力（延伸强度）”方法

规定非比例伸长应力用拉伸方法测定有几种方法，其中主要采用“逐级施力法”。

试验采用标准比例试样、引伸计和相应的力测量记录装置。

试样尺寸：直径 10mm，标距长度 50mm。试样夹在试验机夹头，安装引伸计（图 1-6）。

在测定规定非比例伸长应力之前，估计材料的比例极限 R_p （或者称为比例延伸强度），现估计其为 600MPa。具体测定方法是：取估计的比例极限的 10% 的载荷为初载荷 F_0 ，即： $F_0 = 10\% \times A_0 \times R_p = 0.1 \times 78.5 \times 600 = 4710\text{N}$ ，取整为 5000N。