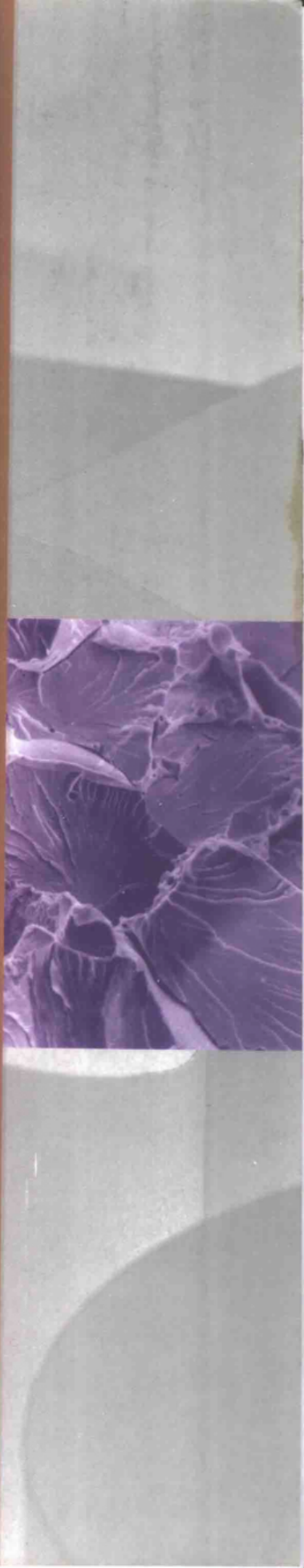


材料科学与工程系列教材

# 金属力学性能

孙茂才 编著

哈尔滨工业大学出版社



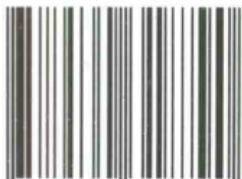
责任编辑 孙雅杰  
封面设计 卞秉利



ISBN 7-5603-1879-7

TG · 60 定价 23.00 元

ISBN 7-5603-1879-7



9 787560 318790 >

# 金属力学性能

孙茂才 编著

哈尔滨工业大学出版社

·哈尔滨·

## 内 容 简 介

本书主要介绍金属力学性能有关的基础知识,以现象—机理—指标—影响因素—应用为主干线进行编写。本书可作为高等学校材料专业本科生教材和研究生教学参考书,也可供工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

金属力学性能/孙茂才编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2003.6

ISBN 7-5603-1879-7

I. 金... II. 孙... III. 金属-力学性质  
IV. TG113.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 012389 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006  
传 真 0451—6414749  
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂  
开 本 787×1092 1/16 印张 18 字数 420 千字  
版 次 2003 年 6 月第 1 版 2003 年 6 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 7-5603-1879-7/TG·60  
印 数 1~3 000  
定 价 23.00 元

# 前 言

本书是根据教育部调整后的高等学校最新专业目录和全国材料科学与工程类专业教学指导委员会的精神,结合作者二十几年的教学经验而编写的。本书被列入国家“九五”重点图书出版规划。本书主要供高等学校金属材料专业本科生使用,某些章节也可供研究生及工程技术人员参考。

本书的主要内容是讲叙金属在常规条件下的变形及断裂,在特殊条件下的变形及断裂,从而派生出各章节。

第1章介绍静载条件下的力学性能,以讲述拉、压、弯、扭及硬度基本指标为主。第2章介绍金属常规条件下的变形,对弹性变形、屈服、塑性变形、变形强化及弹性缺陷等进行深入探讨。第3章介绍金属常规条件下的断裂,主要讲述断裂强度及各种类型断口的产生过程及各种类型的断裂过程。第4章介绍金属的断裂韧性,主要讲述断裂力学基本知识及断裂力学指标。第5章介绍金属的冷脆,这章是由金属在低温条件下的变形及断裂派生出来的。第6章介绍金属的疲劳,主要介绍疲劳的经典概念及用断裂力学解决疲劳问题的全新概念,是特殊载荷条件下金属的变形及断裂。第7章介绍金属应力腐蚀开裂及氢脆,主要讲述特殊介质条件下金属的变形及断裂。第8章介绍金属的磨损与接触疲劳,主要讲述接触应力条件下金属的变形与断裂。第9章介绍金属的蠕变,主要讲述高温条件下金属的变形及断裂。第10章介绍金属在高速加载下的力学行为。此外,在第2、5、7章之后,分别提供了与该章内容相关的科研论文(其中一篇为英文),以便学生深入理解相关知识和学习论文写作方式。

刘春英、孙宇辉、王日昆在编写过程中做了很多工作,孙宇航在有关统计方面内容给以指导把关,姚枚教授是编者的导师,整个体系受导师思路影响很大,编者对他们深表谢意。

本书主要参阅国内流行名流编著的教材及一些科研新成果,在此表示衷心的感谢,书中如有失误,望广大读者批评指正,谢谢。

作 者  
2003 年 1 月

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 金属静载机械性能           | 1  |
| 1.1 光滑试件静拉伸机械性能          | 1  |
| 1.2 真实应力 - 应变曲线          | 8  |
| 1.3 其他静载机械性能             | 12 |
| 1.4 金属的硬度                | 20 |
| 习 题                      | 31 |
| 第 2 章 金属的变形              | 32 |
| 2.1 金属的弹性变形              | 32 |
| 2.2 金属的弹性模数              | 35 |
| 2.3 金属的弹性不完整性            | 37 |
| 2.4 金属的塑性变形              | 40 |
| 2.5 金属的屈服强度              | 43 |
| 2.6 金属的形变强化              | 54 |
| 习 题                      | 60 |
| 科研论文——船用尾轴 35# 圆钢的振动时效处理 | 62 |
| 第 3 章 金属的断裂              | 66 |
| 3.1 金属的断裂强度              | 66 |
| 3.2 金属的实际断裂强度            | 67 |
| 3.3 生成初生微裂纹的位错理论         | 69 |
| 3.4 金属的解理断裂              | 73 |
| 3.5 金属的韧性断裂              | 78 |
| 3.6 金属的沿晶断裂              | 83 |
| 3.7 光滑件的解理断裂             | 84 |
| 3.8 缺口件的解理断裂             | 86 |
| 3.9 光滑件的塑性断裂             | 86 |
| 3.10 缺口件的塑性断裂            | 89 |
| 3.11 金属材料裂纹敏感性的本质        | 91 |
| 习 题                      | 92 |

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 第 4 章 金属的断裂韧性 .....                                                                                    | 93  |
| 4.1 裂纹尖端应力场强度因子 $K_I$ 及断裂韧性 $K_{Ic}$ .....                                                             | 94  |
| 4.2 裂纹扩展的能量率 $G_I$ .....                                                                               | 104 |
| 4.3 弹塑性条件下的断裂韧性 .....                                                                                  | 105 |
| 4.4 断裂韧性的测试 .....                                                                                      | 110 |
| 4.5 影响断裂韧性的因素 .....                                                                                    | 126 |
| 习 题 .....                                                                                              | 130 |
| 第 5 章 钢的冷脆 .....                                                                                       | 131 |
| 5.1 钢的冷脆 .....                                                                                         | 131 |
| 5.2 冷脆的评定方法 .....                                                                                      | 133 |
| 5.3 影响冷脆的因素 .....                                                                                      | 144 |
| 习 题 .....                                                                                              | 148 |
| 科研论文——蜗壳用钢板冷脆转变温度的定量确定 .....                                                                           | 149 |
| 第 6 章 金属的疲劳 .....                                                                                      | 152 |
| 6.1 金属疲劳现象 .....                                                                                       | 152 |
| 6.2 疲劳抗力指标 .....                                                                                       | 157 |
| 6.3 疲劳破坏的物理过程 .....                                                                                    | 171 |
| 6.4 影响疲劳抗力的因素 .....                                                                                    | 180 |
| 6.5 金属的低周疲劳 .....                                                                                      | 188 |
| 习 题 .....                                                                                              | 190 |
| 第 7 章 金属的应力腐蚀开裂及氢脆 .....                                                                               | 191 |
| 7.1 应力腐蚀开裂 .....                                                                                       | 191 |
| 7.2 氢 脆 .....                                                                                          | 197 |
| 习题 .....                                                                                               | 207 |
| 科研论文——THE EFFECT OF TEMPERING ON MECHANICAL PROPERTIES<br>OF 50Mn18Cr4WN RETAINING RING MATERIAL ..... | 208 |
| 第 8 章 金属的磨损及接触疲劳 .....                                                                                 | 214 |
| 8.1 摩擦及磨损现象 .....                                                                                      | 214 |
| 8.2 磨损机理及影响因素 .....                                                                                    | 215 |
| 8.3 提高耐磨性的途径 .....                                                                                     | 222 |
| 8.4 磨损试验方法 .....                                                                                       | 223 |
| 8.5 接触疲劳 .....                                                                                         | 226 |
| 习 题 .....                                                                                              | 235 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第 9 章 金属高温机械性能 .....       | 236 |
| 9.1 金属的蠕变与蠕变断裂 .....       | 237 |
| 9.2 蠕变极限与持久强度 .....        | 240 |
| 9.3 松弛稳定性 .....            | 244 |
| 9.4 其他高温机械性能 .....         | 247 |
| 习 题 .....                  | 248 |
| 第 10 章 金属在高速加载下的力学行为 ..... | 249 |
| 10.1 高速载荷的基本概念 .....       | 249 |
| 10.2 光滑细长杆件上弹性波动特征 .....   | 249 |
| 10.3 高速率下金属力学性能指标变化 .....  | 257 |
| 习 题 .....                  | 263 |
| 附录 1 金属力学性能现行国家标准目录 .....  | 264 |
| 附录 2 常用单位换算表 .....         | 266 |
| 附录 3 钢铁硬度与强度对照表 .....      | 267 |
| 附录 4 三点弯曲和紧凑拉伸的计算函数表 ..... | 274 |
| 参考文献 .....                 | 277 |

# 第 1 章 金属静载机械性能

机械性能指标是机械设计、制造、选材、工艺评定及内外贸易定货的主要依据。静载是相对于交变载荷和高速载荷而言。静载机械性能是上述活动主要依据的一部分。本章讨论静载机械性能的定义、测定方法及其意义特点等。

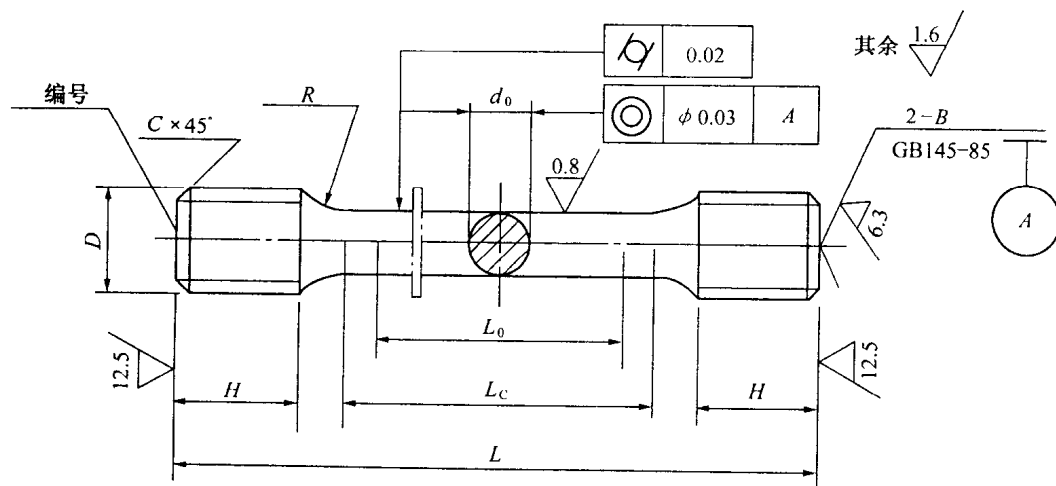
## 1.1 光滑试件静拉伸机械性能

金属在单向应力、双向应力和三向应力条件下会得出机械性能差别很大的试验结果。单向应力测得材料屈服强度在三向应力条件下可提高到 1.68 倍以至更高。所谓光滑试件,就是为了使金属材料承受单向应力的试件。一般柱状试件可以满足这个条件,圆柱、棱柱均可。单向应力条件下测得的材料指标比较稳定,具有广泛的可比性,所以广为国内外科科技、生产及贸易部门采用。各国标准也都对这个问题做了严格的规定。

### 1.1.1 光滑拉伸试件

光滑试件实际是相对于缺口或裂纹试件而言。光滑件可保证受试材料承受单向拉应力。而缺口或裂纹试件必然导致受试部位材料处于双向或三向受力状态。一般所用试件为圆柱和板状试件(横断面为长方形)。

我国国家标准 GB6397—86《金属拉伸试验试样》对拉伸试样做了严格的规定。图 1-1-1是按标准给出的试件,当然还有相应的文字技术要求。



| 试样号 | $d_0$              | $D$    | $C$ | $R$ | $L_0$ | $L_c$ | $H$ | $L$ | $B$    |
|-----|--------------------|--------|-----|-----|-------|-------|-----|-----|--------|
| GR1 | $\phi 10 \pm 0.03$ | M16-6h | 2   | 10  | 50    | 60    | 20  | 114 | B1.6/5 |
| GR2 | $\phi 5 \pm 0.03$  | M12-6h | 2   | 5   | 25    | 30    | 15  | 70  | B1.6/5 |
| GR3 | $\phi 4 \pm 0.03$  | M8-6h  | 1   | 4   | 20    | 24    | 10  | 51  | B1.3/5 |

图 1-1-1 国家标准中规定的一种拉伸试件

光滑拉伸试件由三部分组成。一是工作部分,图 1-1-1 中  $L_0$  是拉伸试件的工作部分,它在原材料或部件中的取向、部位及自身形状、各种精度、光洁度及加工程序等在标准中都有详细的规定。二是过渡部分,图 1-1-1 中  $R$  部位,它是工作部分向外过渡的部分。这部分拉伸时会产生严重应力集中,处理不好会在此断裂,导致实验的失败,尤其对脆性材料。三是夹持部分,图 1-1-1 中  $H$  部位。这部分一是要保证自身承载能力,在整个实验过程中不能断裂;二是要保证把载荷正确地加到工作部分上去。

拉伸试件任何一部分出了误差都会导致实验失败。严格执行国家标准是保证实验成功的基础,也是实验者自身利益的法律保证。

### 1.1.2 拉伸曲线及应力应变曲线

拉伸试验机或其附加仪器可以记录拉伸试件上在受拉力作用时所受到拉伸载荷  $P$  和试件工作部分的伸长  $\Delta l$ ,得到一个载荷 - 伸长曲线,称为拉伸曲线或拉伸图。不正确的试验方法可能把试验机夹具部分重量混到载荷  $P$  中,把试验机的变形混到伸长变形  $\Delta l$  中去。拉伸图如图 1-1-2 所示。

图 1-1-2 是退火低碳钢的拉伸图,图的纵坐标表示载荷  $P$ ,单位是 N(力),横坐标表示绝对伸长  $\Delta l$ ,单位是 mm(长度)。

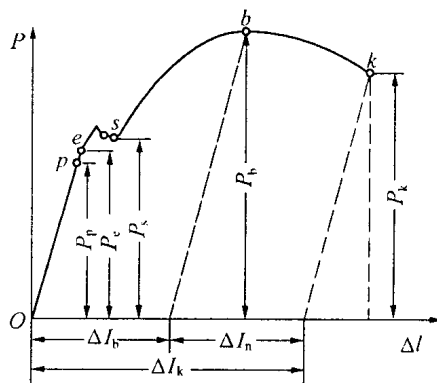


图 1-1-2 常见的拉伸图(拉伸曲线)

载荷比较小时,试样伸长随载荷成正比地增加,保持直线关系。载荷超过  $P_p$  后,拉伸曲线开始偏离直线。保持直线关系的最大载荷,是比例极限载荷  $P_p$ 。

变形开始阶段,卸荷后试样立刻恢复原状,这种变形是弹性变形。当载荷大于  $P_e$  再卸荷时,试样的伸长只能部分地恢复,而保留一部分残余变形。卸荷后的残余变形叫做塑性变形。开始产生微量塑性变形的载荷是弹性极限的载荷  $P_e$ 。一般说来,  $P_p$  与  $P_e$  是很接近的。

载荷增加到一定值时,载荷指示器(测力计刻度盘)的指针停止转动(载荷停止增加)或开始往回转(载荷减小),拉伸图上出现了平台或锯齿,这种在载荷不增加或减小的情况下,试样还继续伸长的现象叫做屈服。屈服阶段的最小载荷是屈服点的载荷  $P_s$ 。屈服后,金属开始明显塑性变形,试样表面出现滑移带。

在屈服阶段以后,欲继续变形,必须不断增加载荷。随着塑性变形增大,变形抗力不断增加的现象叫做形变强化或加工硬化。当载荷达到最大值  $P_b$  后,试样的某一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。

由于缩颈处试样截面急剧缩小,致使载荷下降。拉伸图上的最大载荷是强度极限的载荷  $P_b$ 。

载荷达  $P_k$  时,试样断裂,这个载荷称为断裂载荷。

塑性变形阶段有的试件可以看到最大剪应力方向(与拉伸方向成  $45^\circ$ ) 出现宏观的滑移线。颈缩部位材料受力不再是单向应力而是双向或三向应力。金属材料的拉伸曲线一般弹性部分都存在,而其他部分可能有可能无。一般情况下,金属在外力作用下,变形过程可以分为三个阶段,即弹性变形阶段、塑性变形阶段和断裂。实际上,上述阶段之间没有绝对的分界点。

拉伸图给出许多数据,主要是向纵或横坐标作垂线,或作弹性部分的平行线。我们可以得到各种条件下的特定载荷和特定变形。比如说,可以确定某段塑变曲线对应的弹性变形、塑性变形及载荷的增加量。

如果用试件原始截面积  $F_0$  去除拉伸力,即

$\sigma = \frac{P}{F_0}$  (MPa) 得到应力  $\sigma$ 。以试件工作部分长度

$l_0$  (mm) 去除绝对伸长  $\Delta l$ , 即  $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$  (无单位),

得到相对伸长  $\epsilon$ , 称为应变。把 1-1-2 拉伸图纵坐标值  $P$  除以  $F_0$ , 横坐标  $\Delta l$  除以  $l_0$ , 可将拉伸图变

为应力 - 应变曲线, 如图 1-1-3 所示。拉伸图和应力 - 应变曲线之间的关系可以从  $l_0 = 5d$ ,

$F_0 = \frac{\pi d^2}{4}$ , 导出  $F_0 = \frac{\pi l_0^2}{100}$  确定。有书中说拉伸图

和应力 - 应变曲线是相似的, 好像不太准确。应力 - 应变曲线纵坐标一般用 MPa 表示, 横坐标用 % 表示。应力 - 应变曲线方便之处是可以从曲线上直接读出材料的机械性能指标, 如屈服强度  $\sigma_{0.2}$ 、抗拉强度  $\sigma_b$ 、伸长率  $\delta_k$  等。

应力 - 应变曲线纵坐标一般用 MPa 表示, 横坐标用 % 表示。应力 - 应变曲线方便之处是可以从曲线上直接读出材料的机械性能指标, 如屈服强度  $\sigma_{0.2}$ 、抗拉强度  $\sigma_b$ 、伸长率  $\delta_k$  等。

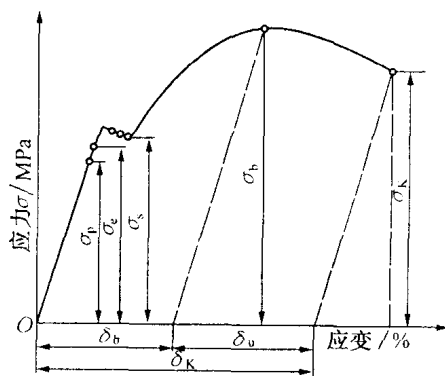


图 1-1-3 应力 - 应变曲线

### 1.1.3 强度指标及其测定

#### 1. 比例极限 $\sigma_p$

弹性变形和塑性变形之间没有绝对的分界点, 比例极限的定义与测量是人为限定条件下的力学性能指标。

比例极限  $\sigma_p$  是应力与应变成正比关系的最大应力, 即在应力 - 应变曲线上开始偏离直线时的应力

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_0} \quad (\text{MPa}) \quad (1-1-1)$$

式中  $P_p$  —— 比例极限的载荷, N;

$F_0$  —— 试样的原截面积,  $\text{m}^2$  或  $\text{mm}^2$ 。

实际在拉伸曲线上, 不是测定开始偏离直线那一点的应力, 而是测定偏离一定值的应力。一般规定曲线上某点切线和纵坐标夹角的正切值  $\tan \theta'$  比直线部分和纵坐标夹角的正切值  $\tan \theta$  增加 50% 时, 则该点对应的应力即为规定比例极限  $\sigma_{p0.01}$  (简称为  $\sigma_p$ ), 见图 1-1-4。

如果要求高时,也可规定偏离值为 25% 或 10%,此时所对应的应力为  $\sigma_{p_{25}}$  或  $\sigma_{p_{10}}$ ,显然,  $\sigma_{p_{30}} > \sigma_{p_{25}} > \sigma_{p_{10}}$ 。

关于比例极限的具体测定方法可参考国家标准 GB228—87。

## 2. 弹性极限 $\sigma_e$

弹性极限是定义材料由弹性变形过渡到塑性变形的应力,这也是人为界定的过渡。认为弹性变形极限以后就开始发生塑性变形,但弹性变形并没有停止。

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0} \quad (\text{MPa}) \quad (1-1-2)$$

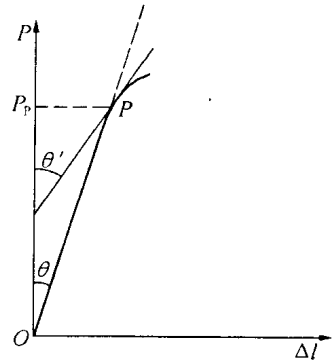


图 1-1-4 规定比例极限

式中  $P_e$  为弹性极限的载荷(N)。和比例极限一样,测出的弹性极限也受测量精度的影响。为了便于比较,根据零件的工作条件要求,规定产生一定残余变形的应力,作为“规定弹性极限”,因此,国家标准中把弹性极限称为“规定残余伸长应力”。规定以残余伸长为 0.01% 的应力作为规定残余伸长应力,并以  $\sigma_{0.01}$  表示。可见,弹性极限并不是金属对最大弹性变形的抗力,因为应力超过弹性极限之后,材料在发生塑性变形的同时还要继续产生弹性变形。所以,弹性极限是表征开始塑性变形的抗力,严格说来,是表征微量塑性变形的抗力。

工作条件不允许产生微量塑性变形的零件,设计时应该根据规定弹性极限数据来选材。例如,如果选用的弹簧材料,其规定弹性极限低,弹簧工作时就可能产生塑性变形,尽管每次变形可能很小,但时间长了,弹簧的尺寸将发生明显的变化,导致弹簧失效。

理论上,材料的弹性极限  $\sigma_e$  较比例极限  $\sigma_p$  稍大一点,但规定弹性极限和规定比例极限有时颇为接近。例如,炮钢的  $\sigma_{0.01}$  与  $\sigma_p$  值是等同的。所以国家标准把规定残余伸长应力  $\sigma_{0.01}$  并列于规定比例极限之后,为的是在材料强度指标中逐步取消规定比例极限  $\sigma_p$ 。因为在机件设计、制造与运转过程中,在最大许用应力条件下是否会产生或产生多少微量残余变形是有实际意义的。可见,规定残余伸长应力比较切合实际。因此,许多国家已取消了规定比例极限。

规定残余伸长应力  $\sigma_{0.01}$  的测量方法与测定屈服强度  $\sigma_{0.2}$  相似,均可采用图解法。在自动记录装置绘出的载荷 - 伸长(夹头位移)曲线(图 1-1-5)上,自弹性直线段与横坐标轴的交点 O 起,截取 0.01%  $l_0$  一段残余伸长的距离 OC,再从 C 点作平行于弹性直线线段的 Ce 线,交拉伸曲线于 e 点。对应于 e 点的载荷,便是规定残余伸长应力的载荷  $P_{0.01}$ ,即可算出  $\sigma_{0.01}$  值。确定  $\sigma_{0.01}$  的拉伸图,伸长坐标比例应不低于 1 000 倍。

## 3. 屈服极限

### (1) 屈服点

有些材料在受拉伸过程中会出现载荷停止增加或有所下降,而伸长仍在继续,如图 1-1-6(a) 所示。出现屈服齿,齿的最高点应力称为上屈服点  $\sigma_{su}$ ,齿的最低点应力称为下屈服点  $\sigma_{sl}$ ,如图 1-1-6(b) 所示,且以下屈服齿最低应力作为材料的屈服点,即

$$\sigma_{su} = \frac{P_{su}}{F_0} \quad (\text{MPa})$$

$$\sigma_{SL} = \frac{P_{su}}{F_0} \quad (\text{MPa})$$

$$\sigma_s = \frac{P_{SL}}{F_0}$$

$\sigma_s$  称为材料的屈服点,材料出现屈服齿现象称为物理屈服,有时屈服齿为平台。物理屈服现象是一个重要金属学现象。

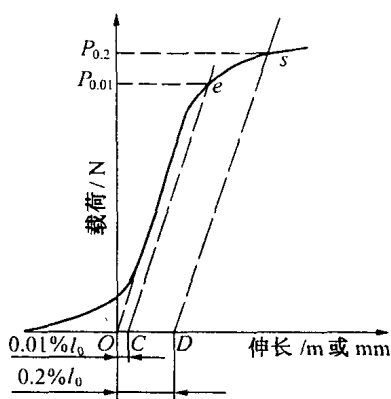


图 1-1-5 图解法确定  $\sigma_{0.01}$  及  $\sigma_{0.2}$

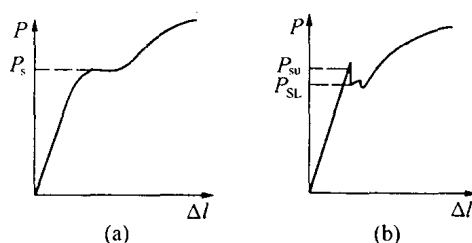


图 1-1-6 屈服点的确定  
(a) 平台状屈服 (b) 锯齿状屈服

## (2) 屈服强度

许多金属拉伸时会出现物理屈服现象,而有许多金属却没有物理屈服现象。把规定产生 0.2% 残余伸长所对应的应力称为屈服强度,用  $\sigma_{0.2}$  表示

$$\sigma_{0.2} = \frac{P_{0.2}}{F_0} \quad (\text{MPa}) \quad (1-1-3)$$

$P_{0.2}$  的确定见图 1-1-5。

GB228—87、GB3076—82、GB/T4338—1995、GB/T13239—91 等国家标准规定了各种条件下屈服点及屈服强度的合法测定方法。

关于规定残余变形强度对应的材料强度指标各国及国外公司有不同的约定,它们之间的关系可以用图 1-1-7 表示。工程上它们之间差异没有什么实际的意义,而研究材料行为时常看重这个差异。英文用 Yield Strength (MPa) 表示屈服强度,数字要按国家标准或杂志要求约定处理。

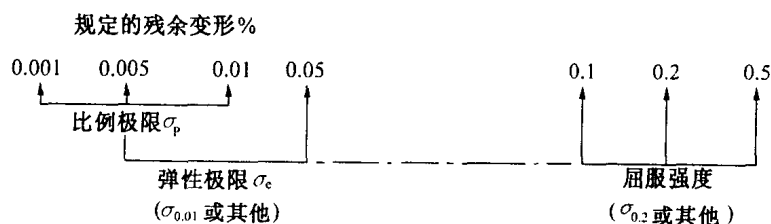


图 1-1-7 规定的残余变形强度所规定的残余变形量

#### 4. 抗拉强度

抗拉强度  $\sigma_b$  是试件拉断以前的最高载荷除以试件原始横断面积, 即

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0} \quad (\text{MPa}) \quad (1-1-4)$$

$P_b$  为断裂以前的最高载荷,  $F_0$  为试件的原始横断面积。对塑性材料来说,  $\sigma_b$  为均匀塑性变形与集中塑性变形(即颈缩)的分界点。它是试件产生最大均匀变形的抗力, 也是材料能承受的最大拉应力。抗拉强度是工程设计、材料研究及材料定货的主要依据之一。 $\sigma_b$  是材料五大机械性能指标之一。GB228—87、GB3076—82、GB/T4338—1995 和 GB/T13239—91 等国家标准也相应规定了各种条件下抗拉强度的法定测试方法。 $P_b$  的确定方法见图 1-1-8。抗拉强度英文用 Tensile Strength (MPa) 表示, 数字按相关约定表示。

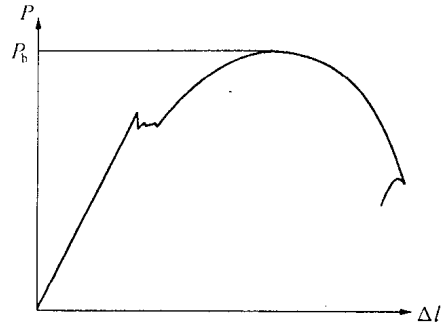


图 1-1-8 测抗拉强度时  $P_b$  的确定方法

#### 5. 断裂强度 $S_k$

试件受拉力作用时, 其实际截面积在不断地缩小, 弹性变形时截面缩小得很小。均匀塑性变形时缩小得很明显, 而集中塑性变形时横截面积急剧减小, 断口处缩到最小。我们用这时的横截面积去除这时的载荷, 即得到断裂强度  $S_k$ , 即

$$S_k = \frac{P_k}{F_k} \quad (1-1-5)$$

其中  $P_k$  为断裂时的载荷,  $F_k$  为断口处的横断面积。

##### 1.1.4 塑性指标及其测定

金属会产生塑性变形, 通常金属塑性变形能力用其断裂前产生的最大塑性变形代表其塑性指标。这里介绍拉伸时的伸长率  $\delta_k$  和断面收缩率  $\psi_k$ 。

##### 1. 伸长率 $\delta_k$ (或 $\delta$ )

###### (1) 伸长率的定义

伸长率是试件断裂后试件标距长度的相对伸长值, 它定义为标距的绝对伸长  $\Delta l_k = l_k - l_0$  除以  $l_0$  的百分数

$$\delta_k = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\% = \frac{\Delta l_k}{l_0} \times 100\% \quad (1-1-6)$$

式中  $l_0$ ——试件的标距长;

$l_k$ ——断裂后标距伸长后的长度;

$\Delta l_k$ ——断裂后标距伸长后的绝对伸长。

比例试件的伸长率用  $\delta_5$ 、 $\delta_{10}$  表示, 非比例试件伸长率标以角注, 如  $\delta_{100}$ 、 $\delta_{200}$  的角注分别表示  $l_0 = 100\text{mm}$ 、 $200\text{mm}$ 。伸长率用英文 Elongation A5% 表示, 数字按相关约定给出。

### (2) 断裂位置的移位处理

图 1-1-9 上方的影线表示试样上塑性变形的分布情况,可以看出,缩颈处(断裂位置)变形最大,距离断裂位置越远,变形越小。断裂位置是对  $\delta$  有影响的,其中以断在正中的试样所得的伸长率最大。为了便于比较,规定以断在标距的中央 1/3 段试样的伸长率为测量标准;如断在标距的两端的 1/3 段时,则要求用位移法换算成相当于断在正中时的伸长率。

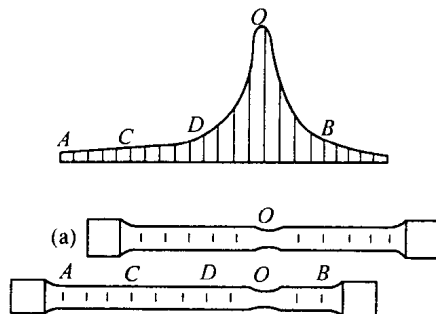


图 1-1-9 试件上塑性变形的分布

段位法:如拉断处到最邻近标距端点的距离小于或等于  $1/3 L_0$  时,则按下述方法测定  $L_1$ :在长段上从拉断处  $O$  取基本等于短段格数,得  $B$  点,接着取等于长段所余格数(偶数,图 1-1-10(a))的一半,得  $C$  点;或者取所余格数(奇数,图 1-1-10(b))分别减 1 与加 1 的一半,得  $C$  和  $C_1$  点。移位后的  $L_1$  分别为:  $AB + 2BC$  和  $AB + BC + BC_1$ 。

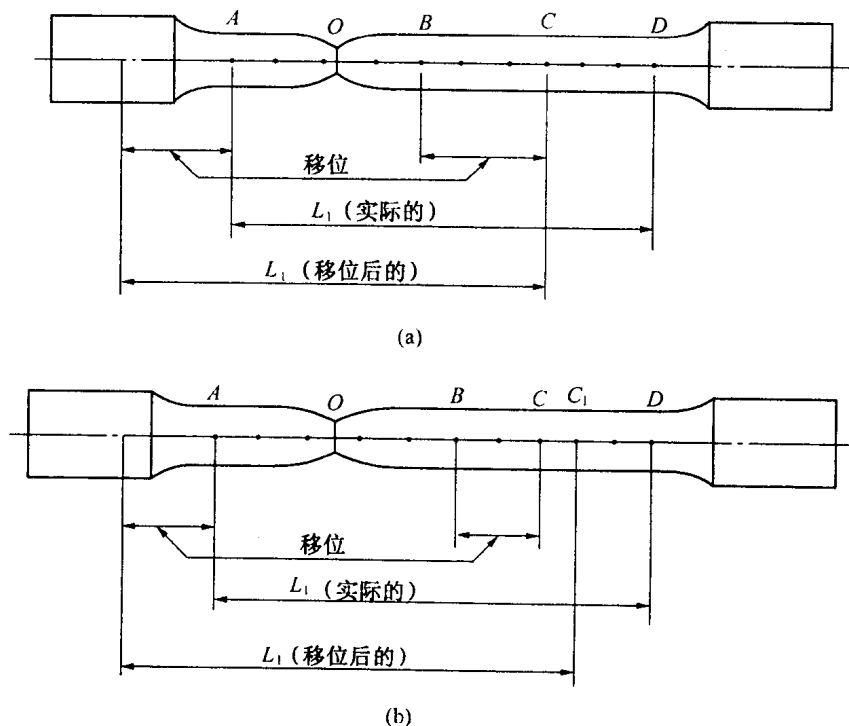


图 1-1-10 移中办法

### (3) $l_0$ 和 $F_0$ 对 $\delta_k$ 的影响

试件工作部分的几何尺寸对  $\delta_k$  有很大影响,也就是工作部分的横截面积  $F_0$  和工作部分  $l_0$  对  $\delta_k$  有很大影响。

拉断后试件工作部分  $l_0$  的伸长为  $\Delta l_k$ , 从拉伸曲线上可以看到

$$\Delta l_k = \Delta l_B + \Delta l_u$$

 $\Delta l_B$  为均匀塑性变形,  $\Delta l_u$  为集中塑性变形。

实验发现,  $\Delta l_B = \beta l_0$ ,  $\beta$  为材料常数;  $\Delta l_u = \gamma \sqrt{F_0}$ ,  $\gamma$  为材料常数。

$$\Delta l_k = \Delta l_B + \Delta l_u = \beta l_0 + \gamma \sqrt{F_0}$$

$$\delta_k = \frac{\Delta l_k}{l_0} = \beta + \gamma \frac{\sqrt{F_0}}{l_0} \quad (1-1-7)$$

其中,  $\beta$ 、 $\gamma$  为常数(对同一块均匀同性的材料试料), 式 1-1-7 说明  $\delta_k$  值除决定于材料自身外, 还与  $\sqrt{F_0}$  成正比, 与  $l_0$  成反比。为了使  $\sqrt{F_0}$  和  $l_0$  的影响归一化, 人为规定

$$\frac{\sqrt{F_0}}{l_0} = \frac{1}{5.65}, \frac{1}{11.3}, \text{即 } l_0 = \begin{cases} 5.65 \sqrt{F_0} \\ 11.3 \sqrt{F_0} \end{cases}$$

这样, 大家可以在同一约定下使  $\delta_k$  只反应材料自身的性能。满足  $l_0 = \begin{cases} 5.65 \sqrt{F_0} \\ 11.3 \sqrt{F_0} \end{cases}$  时  $l_0$  称为标距, 上述试件称为比例试件, 不满足上述条件称为非比例试件。 $l_0 = 5.65 \sqrt{F_0}$  时  $\delta_k$  记为  $\delta_5$ 。 $l_0 = 11.3 \sqrt{F_0}$  时  $\delta_k$  记为  $\delta_{10}$ 。 $\frac{l_0}{\sqrt{F_0}} = 5.65$  或  $11.3$  时正好为  $l_0 = 5d_0$ ,  $l_0 = 10d_0$ ,  $d_0$  为圆拉伸试件工作部分横断面的直径。如有兴趣, 可以试计算一下上述说法是否正确。实际上, 人们是首先规定  $l_0 = 5d$  和  $10d$  后导出  $5.65$  和  $11.3$ 。 $l_0 = 5.65 \sqrt{F_0}$  时称  $l_0$  为短标距,  $l_0 = 11.3 \sqrt{F_0}$  时称  $l_0$  为长标距。采用标距测得  $\delta_k$  有可比性, 否则必须报告  $l_0$  的长度, 不报告  $l_0$  长度而给出  $\delta_k$  值无意义。非标距测得  $\delta$  值与别人测得  $\delta$  值之间无比较意义。

## 2. 断面收缩率 $\psi$

断面收缩率  $\psi$  是断裂后试件工作部分截面积的相对收缩值。

试样拉断后缩颈处最小横截面积  $F$  的测定: 对圆形试样, 在缩颈最小处两个相互垂直的方向上测量其直径(需要时, 应将试样断裂部分在断裂处对接在一起), 用两者的算术平均值计算。对矩形试样, 用缩颈处的最大宽度  $b_1$  乘以最小厚度  $a_1$ , 求得(见图 1-1-11)。 $F_0$  为试件工作部分原始横截面积。

断面收缩率计算式为

$$\psi = \frac{F_0 - F}{F_0} \times 100\% \quad (1-1-8)$$

实验表明  $\psi$  与试件尺寸无关。

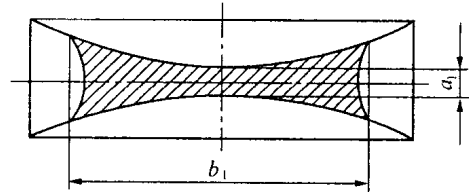


图 1-1-11 板状试件断口尺寸的测量

# 1.2 真实应力 - 应变曲线

## 1.2.1 真实应力与条件应力

拉伸试件在载荷加大过程中试件的横截面积在不断地减小, 如果用原始横截面积去除载荷  $P$ , 得到的是条件应力, 即

$$\sigma = \frac{P}{F_0} \quad (1-2-1)$$

如果任意时刻的载荷被当时对应的横断面去除得到的是真实应力,即

$$S = \frac{P}{F} \quad (1-2-2)$$

真实应力与条件应力之间的关系很容易得出

$$F = F_0(1 - \psi)$$

$$S = \frac{P}{F} = \frac{P}{F_0(1 - \psi)} = \frac{\sigma}{1 - \psi} \quad (1-2-3)$$

可见随载荷增加,横截面积在不断地减小,即  $\psi$  在不断地加大,而真实应力  $S$  在不断地增加。上式也给出真实应力与条件应力之间的关系。

### 1.2.2 真实应变与条件应变

我们定义  $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$  为条件应变,试件在加载过程中  $l_0$  在不断伸长。对任意时刻真正伸长率是这时刻相对于前时刻试件的伸长  $\Delta l_i$  与前一时刻即时长度  $l_i$  之比,即

$$\epsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l_i}$$

试件的真实应变定义为每一时刻的真正伸长率的总和,即

$$e = \frac{\Delta l_1}{l_0} + \frac{\Delta l_2}{l_0 + \Delta l_1} + \frac{\Delta l_3}{l_0 + \Delta l_1 + \Delta l_2} + \cdots + \frac{\Delta l_k}{l_0 + \Delta l_1 + \cdots + \Delta l_{k-1}} \xrightarrow{\Delta l_i \rightarrow 0} \int_{l_0}^{l_k} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_k}{l_0} \quad (1-2-4)$$

$$e = \ln \frac{l_k}{l_0} = \ln \left( \frac{l_0 + \Delta l_k}{l_0} \right) = \ln(1 + \epsilon) \quad (1-2-5)$$

断裂时

$$e_k = \ln(1 + \delta_k)$$

式(1-2-5) 给出了真实应变与条件应变之间的关系。

### 1.2.3 条件断面收缩与真实断面收缩

前面定义断面收缩率

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

实际为条件断面收缩率,而实际上在试件受载荷过程中  $F$  在不断地缩小。某一时刻的真正断面收缩率应为这时刻断面相对于前一时刻断面收缩  $\Delta F_i$  与前一时刻的横断面积  $F_i$  之比,即

$$\psi_i = \frac{\Delta F_i}{F_i}$$

真实断面收缩定义为各时刻真正断面收缩的总和,即

$$\psi_e = \frac{\Delta F_1}{F_0} + \frac{\Delta F_2}{F_0 - \Delta F_1} + \frac{\Delta F_3}{F_0 - \Delta F_1 - \Delta F_2} + \cdots + \frac{\Delta F_k}{F_0 - \Delta F_1 - \cdots - \Delta F_{k-1}} \xrightarrow{\Delta F_i \rightarrow 0}$$