

# 金属的 力学性能测试

魏文光 编著



科学出版社

# 金属的力学性能测试

魏文光 编著

科学出版社

1980

## 内 容 简 介

本书主要介绍了金属力学性能(如拉伸、硬度、冲击、持久、蠕变等)基本原理和试验技术,对试验设备的安装、检定、调整及修理技术和试验数据误差的来源及分析,也做了详细的论述。另外,本书还对断裂力学试验技术做了一定的介绍。

本书可供冶金、机械等方面的工厂试验室及科研单位的有关技术人员和工人阅读,也可作为理工科高等院校有关专业的教学参考书。

## 金属的力学性能测试

魏文光 编著

\*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1980年9月第一版 开本: 787×1092 1/32

1980年9月第一次印刷 印张: 17 1/8

印数: 0001—13,910

字数: 388,000

统一书号: 15031·268

本社书号: 1675·15-2

定 价: 2.10 元

## 前 言

金属的力学性能是金属物理学的重要组成部分。

任何工程结构、机械零件和生产工具在使用过程中都要受到各种形式的外力作用。这就要求金属材料必须具有一种能抵抗外力作用而不超过允许变形或不破坏的能力，这种能力统称为金属的力学性能。

金属材料在外力作用下所表现出来的各种特征，诸如弹性、塑性、韧性、强度等，统称为力学性能指标。

金属的力学性能指标，是机械设计的主要依据。而获得力学性能指标的唯一可靠方法就是进行测试。因此，测试方法的正确性与精度的高低，对机械设计和结构的使用寿命就显得特别重要。所以，在挖掘金属材料的力学性能的潜力和发展新的金属材料，以及在金属材料的理论研究方面，力学性能测试都是必不可少的重要手段。

金属的力学性能测试，是人们从事基础理论研究和分析工程事故所采用的最基本方法。当前，多数测试方法已经标准化。但随着材料科学的飞跃发展，高温（1000°C 以上）、高速、耐腐蚀等新的金属材料的不断出现，又必然对金属材料的力学性能测试提出更高的要求。

本书内容包括力学性能（如拉伸、硬度、疲劳、持久、蠕变）测试技术的各个方面，对有关试验设备的安装、检定、调整及修理技术和试验数据误差的来源及分析，也做了详细的论述。另外，本书还对断裂力学试验技术做了一定的介绍。本书大部分内容是根据作者在生产和科研工作中的实际经验，

结合我国的具体情况总结出来的。其编写方法着重于基本理论的阐述,避免了繁杂的数学公式推导。

本书在内容的编排上,得到了兰州大学张宏图同志的精心指导和沈阳金属研究所葛庭燧同志的热情支持。初稿完成后,张宏图同志还进行了审查和修改。

书中部分内容引用了兄弟单位的有关科研成果。另外,在编写过程中还得到了贾鸿让、唐元祈、孙宝正、李淑芝、陆鼎昌、王国亭、陈洪元、张明智、张安义、孙唤和、季美丽等同志的帮助,在此,特向为本书付出辛勤劳动的上述同志及兄弟单位致谢。

由于作者水平不高,经验不多,书中存在缺点和错误,请读者批评指正。

1978年2月

# 目 录

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 第一章 金属的拉伸试验 .....                       | 1   |
| 一、金属拉伸试验的重要意义 .....                     | 1   |
| 二、应力-应变曲线和屈服点的测试 .....                  | 2   |
| § 1.1 物体的变形和外力间的关系 .....                | 2   |
| § 1.2 应力-应变曲线 .....                     | 3   |
| § 1.3 金属材料微量塑性变形抗力指标的定义和测试方法 .....      | 11  |
| § 1.4 引伸仪 .....                         | 26  |
| § 1.5 影响屈服点的因素 .....                    | 36  |
| 三、抗拉强度极限 $\sigma_b$ 的测试和金属拉伸断口类型 .....  | 43  |
| § 1.6 抗拉强度极限 $\sigma_b$ 的测试及其影响因素 ..... | 43  |
| § 1.7 金属材料拉伸断口的类型 .....                 | 47  |
| 四、塑性指标 $\delta\%$ 及 $\psi\%$ 的测定 .....  | 55  |
| § 1.8 伸长率 $\delta\%$ 的测定 .....          | 56  |
| § 1.9 断面收缩率 $\psi\%$ 的测定 .....          | 59  |
| 五、金属拉伸试验机 .....                         | 61  |
| § 1.10 金属拉伸试验机的分类 .....                 | 61  |
| § 1.11 金属拉伸试验机的结构原理 .....               | 62  |
| § 1.12 金属拉伸试验机的安装和检定 .....              | 75  |
| § 1.13 金属拉伸试验机的误差调整和修理 .....            | 83  |
| 第二章 金属的硬度试验 .....                       | 99  |
| 一、关于硬度的定义 .....                         | 99  |
| 二、常用金属硬度的测量方法 .....                     | 100 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| § 2.1 硬度的静力测量法 .....      | 100 |
| § 2.2 硬度的动力测量法 .....      | 111 |
| 三、硬度计 .....               | 113 |
| § 2.3 硬度计的分类 .....        | 114 |
| § 2.4 硬度计的结构 .....        | 115 |
| 四、硬度计的使用及检定 .....         | 127 |
| § 2.5 硬度计的使用 .....        | 128 |
| § 2.6 硬度计的检定 .....        | 130 |
| 五、硬度计的误差调整和修理 .....       | 136 |
| § 2.7 主观误差产生的原因 .....     | 136 |
| § 2.8 客观误差产生的原因 .....     | 140 |
| § 2.9 硬度计的误差调整和修理 .....   | 148 |
| § 2.10 硬度计特殊示值的调整方法 ..... | 167 |
| 六、金属硬度测试方法的发展 .....       | 175 |
| 第三章 冲击试验 .....            | 187 |
| 一、冲击试验的概况及其意义 .....       | 187 |
| § 3.1 冲击试验的概况 .....       | 187 |
| § 3.2 $A_k$ 的意义 .....     | 188 |
| § 3.3 一次冲击试验的应用 .....     | 190 |
| 二、一次冲击试验方法 .....          | 193 |
| § 3.4 常温冲击试验 .....        | 193 |
| § 3.5 低温冲击试验 .....        | 194 |
| § 3.6 冲击值-温度曲线 .....      | 196 |
| § 3.7 冲击试验方法的发展 .....     | 200 |
| 三、冲击试验机 .....             | 203 |
| § 3.8 冲击试验机的原理和结构 .....   | 203 |
| § 3.9 冲击试验机的安装和检定 .....   | 206 |
| 第四章 疲劳试验 .....            | 212 |
| 一、疲劳试验的历史及其技术意义 .....     | 212 |

|        |                                 |     |
|--------|---------------------------------|-----|
| § 4.1  | 疲劳试验的历史及其现状 .....               | 212 |
| § 4.2  | 疲劳试验的技术意义 .....                 | 213 |
| 二、     | 疲劳破坏的特征及其规律 .....               | 213 |
| § 4.3  | 疲劳破坏的特征 .....                   | 213 |
| § 4.4  | 疲劳破坏的规律 .....                   | 223 |
| 三、     | 疲劳抗力指标的测定 .....                 | 227 |
| § 4.5  | 测定条件 .....                      | 227 |
| § 4.6  | 测定方法 .....                      | 229 |
| 四、     | 疲劳断口分析 .....                    | 231 |
| § 4.7  | 疲劳断口的类型及其区别 .....               | 232 |
| § 4.8  | 疲劳破坏事故的宏观分析 .....               | 235 |
| 五、     | 疲劳试验机 .....                     | 237 |
| § 4.9  | 疲劳试验机的分类和结构 .....               | 237 |
| § 4.10 | 疲劳试验机的检定和维护 .....               | 239 |
| 六、     | 高温疲劳试验 .....                    | 243 |
| § 4.11 | 高温旋转弯曲疲劳简介 .....                | 243 |
| § 4.12 | 影响高温疲劳性能的诸因素 .....              | 245 |
| 第五章    | 压力试验和弯曲试验 .....                 | 258 |
| 一、     | 压力试验 .....                      | 258 |
| § 5.1  | 压力试验的技术意义 .....                 | 258 |
| § 5.2  | 压力试验的规律及特征 .....                | 258 |
| § 5.3  | 压力试验的应用举例 .....                 | 265 |
| 二、     | 弯曲试验 .....                      | 272 |
| § 5.4  | 弯曲试验的技术意义和弯曲图 .....             | 272 |
| § 5.5  | 弯曲试验方法 .....                    | 277 |
| 第六章    | 扭转试验 .....                      | 279 |
| § 6.1  | 扭转试验的技术意义和 $M-\varphi$ 曲线 ..... | 279 |
| § 6.2  | 扭转试验各项力学性能指标的测定 .....           | 283 |
| § 6.3  | 扭转断口分析和高温扭转的应用 .....            | 291 |
| 第七章    | 工艺试验 .....                      | 295 |



|            |                      |            |
|------------|----------------------|------------|
| § 7.1      | 顶锻试验 .....           | 296        |
| § 7.2      | 金属的冷、热弯曲试验 .....     | 305        |
| § 7.3      | 金属的杯突试验 .....        | 309        |
| § 7.4      | 金属的反复弯曲试验 .....      | 311        |
| § 7.5      | 金属管的工艺性能试验 .....     | 314        |
| <b>第八章</b> | <b>蠕变试验 .....</b>    | <b>321</b> |
| 一、         | 蠕变试验的历史和技术意义 .....   | 321        |
| § 8.1      | 蠕变试验的简史 .....        | 321        |
| § 8.2      | 蠕变试验的技术意义 .....      | 322        |
| 二、         | 蠕变变形规律和变形机理 .....    | 323        |
| § 8.3      | 蠕变变形规律及其特征 .....     | 323        |
| § 8.4      | 蠕变变形机理 .....         | 327        |
| § 8.5      | 典型蠕变曲线的理论分析 .....    | 332        |
| 三、         | 描述蠕变过程的曲线方程 .....    | 336        |
| § 8.6      | 以试验数据为依据的经验关系式 ..... | 336        |
| § 8.7      | 从物理概念出发得出的表达式 .....  | 338        |
| 四、         | 蠕变极限的确定 .....        | 339        |
| § 8.8      | 物理蠕变极限和规定蠕变极限 .....  | 339        |
| § 8.9      | 蠕变极限的短时试验法 .....     | 341        |
| 五、         | 蠕变试验技术 .....         | 342        |
| § 8.10     | 蠕变的试验条件 .....        | 342        |
| § 8.11     | 蠕变的试验方法 .....        | 353        |
| § 8.12     | 试验条件对蠕变结果的影响 .....   | 357        |
| 六、         | 蠕变试验机 .....          | 368        |
| § 8.13     | 蠕变试验机的分类 .....       | 368        |
| § 8.14     | 蠕变试验机的结构 .....       | 369        |
| 七、         | 蠕变试验机的检定和调修 .....    | 379        |
| § 8.15     | 蠕变试验机的检定 .....       | 380        |
| § 8.16     | 蠕变试验机的调修 .....       | 390        |
| <b>第九章</b> | <b>持久强度试验 .....</b>  | <b>397</b> |

|                                            |            |
|--------------------------------------------|------------|
| § 9.1 持久强度的定义和试验意义 .....                   | 397        |
| § 9.2 持久断裂机理 .....                         | 399        |
| § 9.3 持久试验技术 .....                         | 410        |
| § 9.4 试验条件对持久试验结果的影响 .....                 | 417        |
| § 9.5 持久强度的外推 .....                        | 420        |
| <b>第十章 断裂力学</b> .....                      | <b>429</b> |
| <b>一、引言</b> .....                          | <b>429</b> |
| <b>二、理论基础</b> .....                        | <b>430</b> |
| § 10.1 裂纹体的断裂理论——Griffith 理论 .....         | 432        |
| § 10.2 Orowan 的修正理论 .....                  | 434        |
| § 10.3 Irwin 理论 .....                      | 435        |
| § 10.4 平面应变断裂韧性 $K_{Ic}$ 的物理意义 .....       | 438        |
| § 10.5 裂纹扩展力的概念 .....                      | 440        |
| § 10.6 塑性区的形状和尺寸 .....                     | 443        |
| § 10.7 应力松弛对塑性区形状的影响 .....                 | 447        |
| § 10.8 有效裂纹的长度 .....                       | 450        |
| <b>三、<math>K_{Ic}</math> 的标准测试方法</b> ..... | <b>454</b> |
| § 10.9 断裂韧性试验判据的应用范围 .....                 | 454        |
| § 10.10 $K_{Ic}$ 试样的尺寸要求 .....             | 455        |
| § 10.11 测试条件 .....                         | 458        |
| § 10.12 $K_{Ic}$ 的测试 .....                 | 467        |
| § 10.13 $K_{Ic}$ 的其他测试方法 .....             | 479        |
| <b>四、弹塑性断裂力学(一)</b> .....                  | <b>489</b> |
| § 10.14 问题的提出 .....                        | 489        |
| § 10.15 COD 的数学表达式 .....                   | 490        |
| § 10.16 D-M 模型 .....                       | 493        |
| § 10.17 COD 的测试方法 .....                    | 496        |
| <b>五、弹塑性断裂力学(二)</b> .....                  | <b>499</b> |
| § 10.18 $J$ 积分的物理意义 .....                  | 499        |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| § 10.19 $J$ 积分的等值定义和测试方法 .....  | 505 |
| 六、断裂力学的应用 .....                 | 519 |
| § 10.20 线弹性断裂力学在工程设计上的应用 .....  | 520 |
| § 10.21 线弹性断裂力学在金属疲劳方面的应用 ..... | 526 |
| § 10.22 断裂力学在应力腐蚀方面的应用 .....    | 531 |
| 参考文献 .....                      | 534 |

# 第一章 金属的拉伸试验

## 一、金属拉伸试验的重要意义

金属的拉伸试验是检验金属材料力学性能普遍采用的一种极为重要的方法。

远在本世纪二十到三十年代，人们在机械制造中选用金属材料时，就开始使用“强度”这一概念来进行设计了。当时，用棒状试样进行简单的拉断，来测定强度。根据某一金属材料在拉断时，单位截面上能承受的最大载荷来判断金属的强度。拉断时能承受较大载荷的材料，就认为强度较高或具有较大的抗断能力。

在科学技术飞跃发展的现代，金属材料的拉伸试验，同样被列为金属力学性能最重要的试验方法之一。由拉伸试验所确定的金属力学性能四大指标（抗拉强度  $\sigma_b$ 、屈服强度  $\sigma_{0.2}$ 、相对伸长率  $\delta\%$ 、断面收缩率  $\psi\%$ ）最富有代表性，而且试验结果准确可靠。

金属力学性能四大指标，是机械制造设计的主要依据。在建筑工程及机械制造等许多领域，凡是受拉伸应力的材料、零件、部件、离开强度（包括屈服强度）指标，设计是无法进行的。

必须指出，本文关于材料强度的概念，只适用于普通拉伸试验的那种极为简单的情况。即拉断前载荷的增加缓慢、温度通常为室温，采用光滑圆试样等。在各种机械的实际工作中，其零部件往往是受到大小、方向都随时间多次变化的载

荷,应力状态也各不相同。因此,在估算材料的强度时,不仅必须知道普通静拉伸时的抗断能力,还必须知道复杂应力条件下的抗断能力。忽略工作条件对材料强度的影响,是许多机械设备发生重大破坏事故的原因。

随着现代喷气发动机和火箭技术的高速发展,金属材料在高温下的力学性能便日益引起重视。由短时高温拉伸试验所测得的强度( $\sigma_b$ 、 $\sigma_{0.2}$ )和塑性( $\delta\%$ 、 $\psi\%$ ),作为飞机使用寿命的设计数据,已经被普遍采用。而短时拉伸试验,也成为标准的试验方法之一。在几秒钟内达到试验温度,并且完成强度测定的方法,正在迅速发展中。

人们在实践中发现,许多机械设备,工程结构,在严寒的冬季发生损坏。于是,就对金属材料在低温(零度以下)下的力学性能开展了深入的试验研究,并取得了显著效果。进而对金属在低温下的拉伸试验加以标准化。

因此,金属的拉伸试验及其测得的性能指标,是研究金属材料在各种使用条件下,确定使用寿命的主要工具之一,是发展新金属材料不可缺少的重要手段。

## 二、应力-应变曲线和屈服点的测试

### § 1.1 物体的变形和外力间的关系

物体在外力的作用下会发生变形。随着外力不断增大,变形程度亦相应的增加,这是人们所熟知的普遍现象。

由于物体的性质不同,外力的大小、方向及其他外界条件的不同,所引起的变形在性质和程度上也不同。

当外力去除后,物体又恢复原来的形状,这种变形称为弹性变形。外力去除后,物体不能恢复原来形状的变形,称为塑性变形或永久变形。

在外力相同、温度相同、力的作用时间不同的条件下，变形会出现性质上的区别。

用同一金属材料制成两个尺寸相同的试样，每个试样上都施加大小相等不致引起塑性变形的的外力。在温度相同的条件下，使施力的时间不同。结果发现，短时作用的外力去除后，金属试样仍然恢复到原来的形状，该力引起的变形是弹性变形；长时间（数百小时以上）作用的外力将引起塑性变形（见第八章蠕变试验）。

对同一种金属材料而言，在温度相同、外力作用时间属于短时的条件下，当外力达到某定值之前，金属材料呈弹性变形的性质。此时，外力和变形的变化规律可用虎克定律来描述，其应力和应变成正比。

当外力达到某定值之后，金属呈塑性变形的性质。随着外力不断增加，金属材料对塑性变形的抗力也相应增大的现象，称之为形变强化或加工硬化。

在断裂前能承受较大塑性变形的金属材料，称为高塑性材料；而断裂前塑性变形较小的金属材料，称为低塑性材料。当然，这都是相对而言，一般用高塑性或低塑性材料来概括表示金属塑性变形的性质。

## § 1.2 应力-应变曲线

### 1. 载荷-伸长曲线

金属材料在外力的作用下要产生变形。如果外作用力是简单的拉应力，金属材料将沿着力的方向被拉长。为了表现不同金属材料的变形在性质上和程度上的区别，可以引用不同形式的曲线。

载荷-伸长曲线，全面地体现了金属材料在单向拉应力作

用下, 从开始变形直至断裂这一过程中的各种性质。

在温度、应力状态、加载速度等都是恒定的条件下, 用光滑圆试样, 沿轴向方向进行常温静拉伸时, 得到的退火低碳钢的载荷-伸长曲线见图 1.1 所示。

必须指出, 温度、应力状态和加载速度(拉伸速度), 对金属材料的力学性能四大指标 ( $\sigma_b$ 、 $\sigma_{0.2}$ 、 $\delta\%$ 、 $\psi\%$ ) 有显著的影响, 所以, 这三个条件必须保持恒定。光滑试样是为避免因缺口效应而造成表面出现三轴拉伸的应力集中。轴向拉伸是指在试验过程中, 试样不允许倾斜或产生偏心。采用圆试样可使塑性指标  $\psi\%$  的测量, 更为方便和精确。

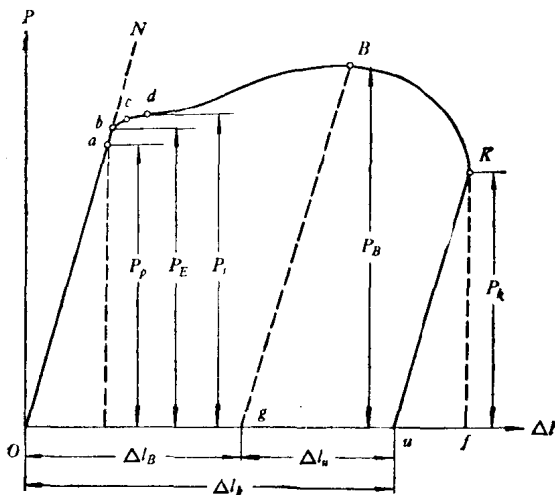


图 1.1 退火低碳钢载荷-伸长曲线

图 1.1 中, 横坐标为试样的伸长  $\Delta l$ , 纵坐标为载荷  $P$ , 它是从拉力试验机的绘图机构中, 由记录直接得到的。曲线是连续的, 每一点都反映载荷和在该载荷作用下的变形规律。现对载荷-伸长曲线进行分析:

$Ob$  段是弹性变形阶段,  $b$  点所对应的载荷为弹性极限载

荷  $P_E$ 。其中  $Oa$  段, 载荷和伸长的关系符合于虎克定律, 即应力和应变成正比。  $a$  点所对应的载荷为比例极限载荷  $P_p$ 。

$bcd$  段为屈服区, 从  $b$  点便开始了塑性变形。  $bcd$  段曲线表现为锯齿状特征, 其锯齿最低位置所对应的载荷, 为物理屈服点载荷  $P_s$ 。

$dB$  段为均匀塑性变形阶段, 这段曲线的长短, 标志着金属材料塑性变形抗力的大小及其形变硬化的能力。  $B$  点所对应的载荷, 为极限强度载荷  $P_B$ 。

$BK$  段是试样局部变形区,  $B$  点以后试样出现了缩颈现象。在缩颈附近出现集中的塑性变形, 使试样的截面积突然减小。此时, 总载荷不断降低(实际上应力仍不断增大), 变形仍然继续进行, 直至  $K$  点试样断裂。  $K$  点所对应的载荷, 为断裂强度载荷  $P_K$ 。缩颈的出现和缩颈区的伸长及收缩, 是金属材料真实塑性及大小的主要标志。

以上是退火低碳钢载荷-伸长曲线的四个主要阶段。该曲线富有代表性, 用它可以说明金属材料在常温静拉伸中的全部行为。不同金属材料, 因其本性不同, 拉伸曲线也各不相同。

## 2. 应力-应变曲线

在图 1.1 中, 将纵坐标的载荷  $P$ , 除以试样的原始横截面积  $F_0$ , 得  $\sigma = \frac{P}{F_0}$ ; 将横坐标的伸长  $\Delta l$ , 除以试样的原始标距长度  $l_0$ , 得  $\delta = \frac{\Delta l}{l_0}$ 。  $\sigma$  和  $\delta$  为条件应力和条件应变值。

以  $\sigma$  为纵坐标,  $\delta$  为横坐标, 重新绘制曲线, 即得到条件的应力-应变曲线。由于  $F_0$  和  $l_0$  都是常数, 所以条件的应力-应变曲线同载荷-伸长曲线的形状完全相同。

试样在拉伸过程中, 横截面积  $F$  不断减小,  $l$  不断增长。



在某瞬间  $\sigma = \frac{P}{F_1}$ ,  $\delta = \frac{\Delta l}{l_1}$  是该时刻的真实应力和应变值。

用  $\sigma = \frac{P}{F_0}$ ,  $\delta = \frac{\Delta l}{l_0}$  代表应力和应变值, 是人为的规定, 所以称之为条件应力和条件应变。条件应力-应变曲线, 有测试方法简单、迅速(由拉力试验机直接记录测得)的特点, 在生产实践中被人们广泛的应用。

将图 1.1 中的纵坐标改成  $\sigma$ , 横坐标改成  $\delta$ , 即可得到条件的应力-应变曲线, 见图 1.2。

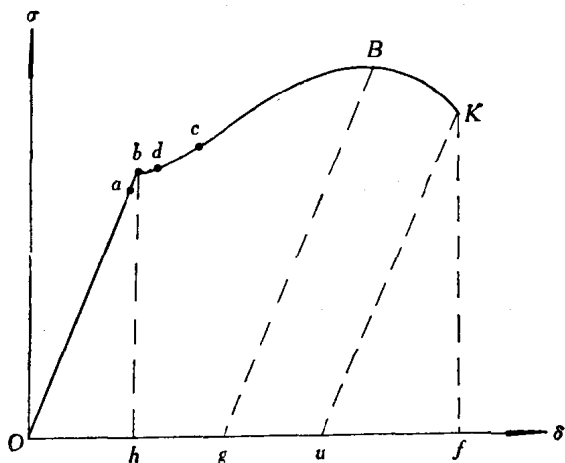


图 1.2 条件应力-应变曲线

现分析条件应力-应变曲线各点的实际意义:

(1) 纵坐标所对应的各点:

a 点,  $\sigma_p = \frac{P_p}{F_0}$  称为比例极限;

b 点,  $\sigma_E = \frac{P_E}{F_0}$  称为弹性极限;

c 点,  $\sigma_o = \frac{P_o}{F_0}$  称为上屈服点, 即屈服区域的最大应力

值;