

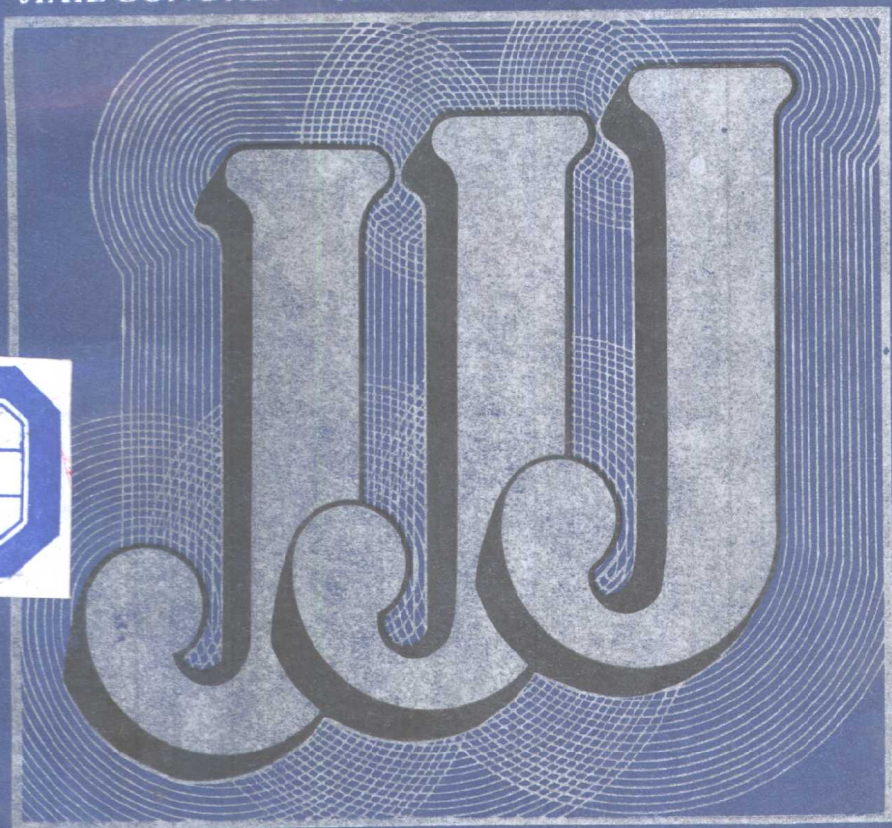
国家机械工业委员会统编

金属机械性能

(高级机械性能实验工适用)

机械工人技术理论培训教材

JIXIE GONGREN JISHULILUN PEIXUN JIAOCAI



机械工业出版社

机械工人技术理论培训教材

金属机械性能

(高级机械性能实验工适用)

国家机械工业委员会统编



机械工业出版社

本书共分十一章，主要包括：金属静载机械性能，金属的变形、断裂、疲劳，金属的断裂韧性、冲击性能和冷脆性，金属的磨损，金属的高温机械性能，机械性能试验用设备，按机械性能评定金属及机件的失效分析。

本书是高级机械性能试验工的培训教材，也可供从事力学、材料科学和强度试验的工程技术人员参考。

本书由国家机械委上海材料研究所凌树森、戎忠良、陈运远、王琼礼；上海发电设备成套设计研究所江先美、上海钢铁研究所钟文达编写，由国家机械委上海材料研究所戎忠良和上海钢铁研究所钟文达审稿。

金 属 机 械 性 能

(高级机械性能实验工适用)

国家机械工业委员会统编

责任编辑：陈 董

责任校对：申建丽

封面设计：林胜利 方 芬

版式设计：霍永明

责任印制：张俊民

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

机械工业出版社发行·新华书店经销

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $12^{3/4}$ · 字数 281 千字

1988年12月北京第一版·1988年12月北京第一次印刷

印数 00,001-13,700 · 定价：4.60元

ISBN 7-111-01163-5/TG·300

前 言

1981年,原第一机械工业部为贯彻、落实《中共中央、国务院关于加强职工教育工作的决定》,确定对机械工业系统的技术工人按照初、中、高三个阶段进行技术培训。为此,组织制定了30个通用技术工种的《工人初、中级技术理论教学计划、教学大纲(试行)》,编写了相应的教材,有力地推动了“六五”期间机械行业的工人培训工作,初步改变了十年动乱造成的工人队伍文化技术水平低下的状况,取得了比较显著的成绩。

鉴于原机械工业部1985年对《工人技术等级标准(通用部分)》进行了全面修订,原教学计划、教学大纲已不适应新《标准》的要求,而且缺少高级部分;编写的教材,由于时间仓促、经验不足,在内容上存在着偏深、偏多、偏难等脱离实际的问题。为此,原机械工业部根据新《标准》,重新制定了33个通用技术工种的《机械工人技术理论培训计划、培训大纲》(初、中、高级),于1987年3月由国家机械工业委员会颁发,并根据培训计划、大纲的要求,编写了配套教材149种。

这套新教材的编写,体现了《国家教育委员会关于改革和发展成人教育的决定》中对“技术工人要按岗位要求开展技术等级培训”的有关精神,坚持了文化课为技术基础课服务,技术基础课为专业课服务,专业课为提高操作技能和分析解决生产实际问题的能力服务的原则。在内容上,力求以

基本概念和原理为主，突出针对性和实用性，着重讲授基本知识，注重能力培养，并从当前机械行业工人队伍素质的实际情况出发，努力做到理论联系实际，通俗易懂，具有工人培训教材的特色，同时注意了初、中、高三级之间合理的衔接，便于在职技术工人学习运用。

这套教材是国家机械工业委员会委托上海、江苏、四川、沈阳等地机械工业管理部门和上海材料研究所、湘潭电机厂、长春第一汽车制造厂、济南第二机床厂等单位，组织了200多个企业、院校和科研单位的近千名从事职工教育的同志、工程技术人员、教师、科技工作者及富有生产经验的老工人，在调查研究和认真汲取“六五”期间工人教材建设工作经验教训的基础上编写的。在新教材行将出版之际，谨向为此付出艰辛劳动的全体编、审人员，各地的组织领导者、以及积极支持教材编审出版并予以通力合作的各有关单位和机械工业出版社致以深切的谢意！

编好、出好这套教材不容易；教好、学好这些课程更需要广大职教工作者和技术工人的奋发努力。新教材仍难免存在某些缺点和错误，我们恳切地希望同志们在教和学的过程中发现问题，及时提出批评和指正，以便再版时修订，使其更完善，更好地发挥为振兴机械工业服务的作用。

国家机械工业委员会

技工培训教材编审组

1987年11月

目 录

前言

第一章 金属静载机械性能	1
第一节 静拉伸	1
第二节 其他静载机械性能	34
第三节 金属静载缺口拉伸强度	45
复习题	51
第二章 金属的变形	53
第一节 概 述	53
第二节 金属的弹性变形	58
第三节 金属的塑性变形	70
复习题	84
第三章 金属的断裂	86
第一节 断裂的分类和断口的宏观特征	86
第二节 断裂强度和断裂过程	97
第三节 断口的微观形貌	103
复习题	108
第四章 金属的疲劳	109
第一节 金属疲劳的基本特征	109
第二节 疲劳抗力指标及其测定	113
第三节 影响疲劳抗力指标的因素	121
第四节 试验结果的统计处理	131
第五节 金属低周疲劳	146
复习题	156
第五章 金属的断裂韧性	157

第一节 概 述	157
第二节 线弹性断裂力学的基本概念	159
第三节 弹塑性断裂力学的基本概念	172
第四节 断裂韧性的测试方法	179
第五节 影响断裂韧性的因素	209
复习题	216
第六章 金属的冲击性能和钢的冷脆性	217
第一节 金属在冲击载荷下的变形与断裂	217
第二节 材料的冲击韧性	222
第三节 钢的低温脆性断裂	229
复习题	252
第七章 金属的磨损	254
第一节 概 述	254
第二节 磨损的类型及其转化	254
第三节 表面膜	262
第四节 影响磨损的因素	263
第五节 提高耐磨性的途径	267
第六节 磨损试验机	273
第七节 磨损的测量及其表面观察分析	282
复习题	285
第八章 金属的高温机械性能	286
第一节 概 述	286
第二节 交变温度下的蠕变和断裂	288
第三节 交变载荷下的蠕变和断裂	295
第四节 高温低周疲劳	299
第五节 高温断裂力学	310
复习题	321
第九章 机械性能试验用设备	323
第一节 材料试验机的分类及基本结构	323

第二节 材料试验机简介	324
复习题	337
第十章 按机械性能评定金属	338
第一节 概 述	338
第二节 对机械性能指标的认识	341
第三节 按机械性能评定金属的结构强度	346
复习题	364
第十一章 机件的失效分析	365
第一节 概 述	365
第二节 失效的类型和抗力指标	370
第三节 失效分析的一般程序	375
第四节 失效分析实例	385
复习题	399

第一章 金属静载机械性能

第一节 静 拉 伸

一、工程应力—应变曲线

在进行拉伸试验时，试样承受的轴向载荷在逐渐增加，同时试样的伸长也在增加。通过测量载荷和伸长，可绘制出载荷—伸长曲线，见图1-1。用载荷除以试样的原始截面积，伸长除以试样原始标距，即

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

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1-2)$$

式中 σ ——应力 (N/mm^2);
 ε ——应变;
 F ——载荷 (N);
 S_0 ——试样原始面积 (mm^2);
 l_0 ——试样原始标距 (mm)。

则载荷—伸长曲线就成了应力—应变曲线。由于应力与应变都是由载荷及伸长分别除以某一常数而得到的，因而应力—应变曲线与载荷—伸长曲线的形状相似。为了和真实应力—应变曲线相区别，因此称

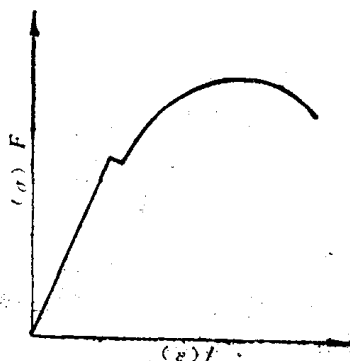


图1-1 载荷—伸长曲线

它为工程应力—应变曲线。

金属应力—应变曲线的形状取决于它的成分、热处理、前期塑性变形史以及应变率、温度和试验时的应力状态。金属的应力—应变曲线能反映材料的下述机械性能：对微量塑性变形的抗力指标、抗拉强度和反映材料塑性性能的指标等三个方面。

1. 对微量塑性变形的抗力 原来工程上常用的比例极限、弹性极限和屈服极限来表示材料对微量塑性变形的抗力指标，但由于塑性变形的起始点很难测定，故采用了下列非比例伸长应力等方法作为材料对微量塑性变形的抗力指标。

(1) 规定非比例伸长应力 σ ，当试样开始受拉时，应力与应变是成正比的，而后逐渐过渡到应变比应力递增得快，也就是产生了非比例伸长。在测试中，以试样标距部分的非比例伸长达规定的原始标距百分比时的应力，例如以产生非比例伸长率0.01%、0.05%、0.2%的应力作为非比例伸长应力 $\sigma_{p0.01}$ 、 $\sigma_{p0.05}$ 、 $\sigma_{p0.2}$ 。对于比例极限、弹性极限，尽管它们的物理意义是明确的，但过去在具体测试中，也是采取非比例伸长的办法。因此，我国最近的金属拉伸试验方法标准，就规定了非比例伸长应力的测定，把该指标的定义和测试方法统一起来了。

(2) 规定总伸长应力 σ ，试样标距部分的总伸长达规定的原始标距百分比时的应力。这个总伸长包括了弹性伸长加塑性伸长。例如达到总伸长率0.5%的应力用 $\sigma_{t0.5}$ 表示。

(3) 规定残余伸长应力 σ ，试样受拉后产生塑性变形，卸除载荷后，试样标距部分的残余伸长达规定的原始标距百分比的应力。例如，产生残余伸长达标距长度的0.2%时用 $\sigma_{r0.2}$ 来表示。

(4) 屈服点 σ_s 。在拉伸过程中,力不增加而仍能继续伸长的应力为屈服点,有些材料在屈服时,力会下降。这时就有上、下屈服点之分。上屈服点为 σ_{s1} ,是指试样发生屈服而力首次下降前的最大应力;下屈服点为 σ_{s2} ,是指不计初始瞬时效应时屈服阶段中的最小应力。在实际使用中,有些材料没有明显的屈服点,这时往往采用 $\sigma_{0.2}$ 作为屈服阶段的特征值。

2. 抗拉强度 拉伸过程中最大载荷 F_{max} 除以试样的初始面积,即

$$\sigma_b = \frac{F_{max}}{S_0} \quad (1-3)$$

式中 σ_b ——抗拉强度 (N/mm²)。

抗拉强度是拉伸试验中提供的最重要指标之一,它是在单向载荷下测得的,但是这和实际上处于复杂应力状态下的材料有效强度几乎无关。采用抗拉强度除以安全系数去确定构件的强度,现在倾向于一种更合理的方法,即以屈服强度为依据进行塑性金属的静态设计。抗拉强度是一种鉴别材料的有用方法,同时,由于抗拉强度易于确定且可重复,故适合于用作材料的技术规格和用以控制产品质量。

3. 塑性 材料的塑性性能从工程应用来看,其意义是:

(1) 表示金属在加工过程中(如轧制、挤压等)能保持不断裂而经受变形的程度。

(2) 表示金属在断裂之前的塑性流动能力。当塑性高时,万一构件出现超载等情况,材料可以容忍,并能产生局部变形而不断裂。

(3) 作为衡量夹杂物程度或加工条件的一种指标。虽然

材料的塑性和使用性能之间无直接联系，但仍可用塑性量度值评定材料的品质。

具体的塑性指标是伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 。这两项指标可在试样拉断后把它对接起来进行测量而得到：

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 l_1 ——标距 l_0 试验后长 (mm)；

S_1 ——断裂后试样最小处面积 (mm²)；

用断面收缩率表示最大变形量比用伸长率要正确。因为断面收缩率反映的是材料变形量最大的那一部分的变形程度，而伸长率和试样工作长度上的直径波动有很大关系。

已知伸长率和断面收缩率，如何判定金属是否形成缩颈？如果 $\psi > \delta$ ，则形成缩颈；并且 ψ 与 δ 之差越大，颈缩越严重；如果 $\psi = \delta$ ，则不形成颈缩。

4. 弹性模量 应力—应变曲线开始的直线部分，两者之间且成正比的。直线段的斜率就是弹性模量。其表达式如下：

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1-6)$$

式中 E ——弹性模量 (N/mm²)。

弹性模量是材料刚性的度量。在同样应力时，模量大，应变就小。由于在计算各种梁和其他构件的挠度时要知道 E ，所以它是一个重要的设计参数。

金属弹性模量与组成金属的原子结构、晶体点阵类型和点阵常数有着密切的关系。即

$$E = \frac{k}{r^m} \quad (1-7)$$

式中 r ——原子间距；

k, m ——材料常数。

温度能改变晶体的点阵常数，即温度升高， r 增大， E 就减小。除温度外，其他如加载速度、合金化、热处理、冷加工对弹性模量的影响都很小。

5. 回能 材料弹性变形时吸收能量，卸载时放出能量的能力。用回能模量来衡量这种能力，它等于材料到屈服应力时单位体积所需应变能，其式如下：

$$U_R = \frac{1}{2} \sigma_s \varepsilon_s = \frac{1}{2} \sigma_s \frac{\sigma_s}{E} = \frac{\sigma_s^2}{2E} \quad (1-8)$$

式中 U_R ——回能模量 ($\text{N} \cdot \text{mm}/\text{mm}^3$)；

σ_s ——屈服点 (N/mm^2)；

ε_s ——屈服时应变。

上式表明：能承受载荷又必须不产生塑性变形的材料应是具有高屈服应力和低弹性模量的材料。

6. 韧性 严格地说，材料的韧性是指其在塑性阶段吸收能量的能力。但目前常用的一种衡量方法是等于应力—应变曲线下面积的总和，这是一个既包含了强度又包含塑性的综合参数。

应力—应变曲线下面积，有以下近似表达式。

对于塑性金属：

$$U_T \approx \sigma_b \varepsilon_f \quad (1-9)$$

或

$$U_T \approx \frac{\sigma_s + \sigma_b}{2} \varepsilon_f \quad (1-10)$$

式中 U_T ——韧性（应力—应变曲线下面积）；

ε_f ——断裂时应变。

对脆性金属其应力—应变曲线假设为抛物线，其面积如下：

$$U_T \approx \frac{2}{3} \sigma_b e_T \quad (1-11)$$

以上都是近似式，而且由于试样都是按原始截面积计算的，所以并不反映塑性阶段的真实情况。

二、真实应力—应变曲线

1. 真实应力与真实应变 上述的应力—应变曲线实际上是条件的，其应力是以原始截面积 S_0 除相应的载荷得到的。应变是以绝对伸长比原长 l_0 来计算的。但在实际拉伸过程中，断面积逐渐在减少，如以试样瞬时的面积除当时的载荷，这就是真实应力。拉伸过程中的真实应力大于名义应力。同样，真实应变是用绝对伸长比上瞬时的标距长度，而不是用原始的标距长度。真实应力及真实应变如下式

$$\sigma_T = \frac{F}{S} \quad (1-12)$$

$$e = \frac{l_1 - l_0}{l_0} + \frac{l_2 - l_1}{l_1} + \frac{l_3 - l_2}{l_2} + \dots \quad (1-13)$$

$$\text{或} \quad e = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (1-14)$$

式中 σ_T ——真实应力 (N/mm^2)；

F ——瞬时载荷 (N)；

S ——瞬时面积 (mm^2)；

e ——真实应变 (mm/mm)；

l ——瞬时长度 (mm)。

试样在均匀伸长阶段时，真实应变 e 和名义应变 e 之间关系如下：

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{l_1}{l_0} - 1$$

$$\frac{l}{l_0} = 1 + \varepsilon$$

$$e = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (1-15)$$

因试样在均匀塑性变形时其体积不变, $S_0 l_0 = S l$ 。因此式 (1-15) 可变化如下:

$$e = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{S_0}{S} \quad (1-16)$$

真实应力 σ_x 与名义应力 σ 之间关系如下:

$$\sigma_x = \frac{F}{S} = \frac{F}{S_0} \frac{S_0}{S}$$

按体积不变关系:

$$\frac{S_0}{S} = \frac{l}{l_0} = 1 + \varepsilon$$

$$\text{故} \quad \sigma_x = \frac{F}{S_0} (1 + \varepsilon) = \sigma (1 + \varepsilon) \quad (1-17)$$

采用真实应变有下列优点

(1) 对称性 设一均匀圆柱体, 拉长到原长度两倍, 其应变 $\sigma = (2l_0 - l_0)/l_0 = 1.0$ 或 100%。为了在压缩时得到同样数值的应变, 圆柱体要压缩到零。但是, 实际上只要压缩到原高度的一半, 就和拉伸到两倍的应变数值相同, 其符号相反。采用真实应变计算, 能得到相同的结果。^[1] 拉伸时, e

$$= \ln \left(\frac{2l_0}{l_0} \right) = \ln 2; \text{ 压缩到原高度一半, } e = \ln \left(\frac{l_0}{\frac{1}{2}l_0} \right) = \ln \left(\frac{1}{2} \right) = -\ln 2。$$

(2) 可加性 真实总应变等于各真实应变之和。如 $l_0 = 50\text{mm}$, 每次拉伸 20%, 两次后成了 72mm, $\sigma = 44\%$, 而

不是 $\delta_1 + \delta_2 = 40\%$ 。采用真实应变可以相加, $e_1 + e_2 = \ln 60 / 50 + \ln 72 / 60 = \ln 72 / 50$ 。

需要指出的是, 在均匀塑性变形阶段, 条件的塑性指标 δ 、 ψ 和真实塑性指标 e 、 ψ 。(真实收缩率)之间在极小量塑性变形情况下, 这些数值可近似认为相等。在其他情况下, δ 最大, ψ 最小, ψ 与 e 及 ψ 关系不如 δ 与 e 及 ψ 。差别那么大, 在30%左右时, $\psi \approx \psi_0$ 。因此, 在条件塑性指标中, ψ 要比 δ 更接近真实的塑性指标, 这也是采用 ψ 比采用 δ 较为合理的原因。

2. 真实应力—应变图

图1-2是真实应力—应变曲线与相应的工程应力—应变曲线的比较, 由于塑性应变较大, 所以将弹性区压缩到 y 轴, 在达到最大载荷之前, 真实应力—应变曲线总是位于工程应力—应变曲线的左方。这符合式(1-17)和式(1-15), 然而在最大载荷之后, 塑性区内局部集中的应变远远超过工程应变, 由最大载荷到拉断往往呈直线, 另外由于缩颈而存在三向应力, 所以缩颈处的平均真应力大于以拉伸为主的三向应力。

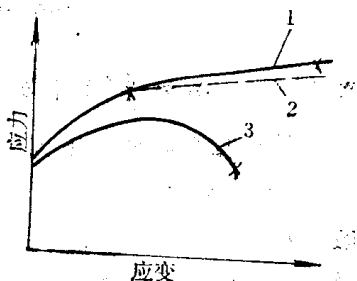


图1-2 工程与真实应力—应变曲线比较

1—真实应力—应变曲线 2—因缩颈而修正的曲线 3—工程应力—应变曲线

图1-3为另一真实应力—应变曲线。图中 $\sigma_{\text{真}}$ 是真实的, 而 ψ 是条件的。由于 ψ 不可能到100%, 最高达60%, 在这个范围内, 条件应变 ψ 与真实应变 ψ 相差不大, 这样用 ψ 代替 ψ , 曲线基本形状不变。

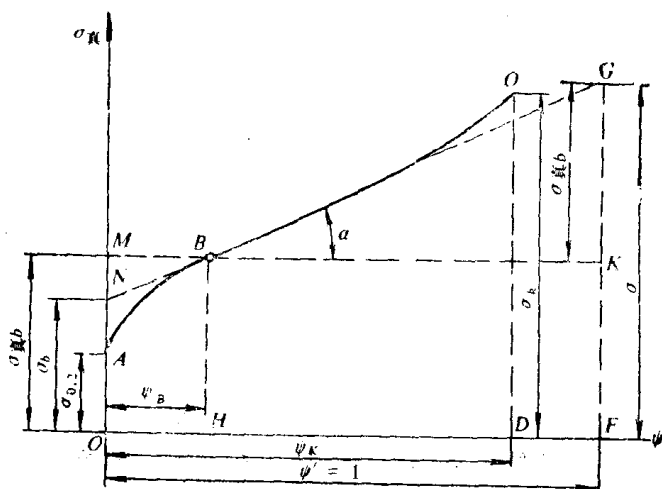


图1-3 $\sigma_K-\psi$ 曲线

图中OABC是由实验得到的。OA段是弹性变形部分,由于弹性变形极小, ψ 变化就更小,几乎与纵坐标重合。AB段是均匀塑性变形部分, B点开始产生缩颈。BC段是集中应力变形部分,这段近似为直线,最后一段有上翘现象,这是由于缩颈后三向应力造成不利于塑性变形的几何硬化引起。

如果将图中曲线起始弯曲部分和弯曲最后翘起部分近似取作直线,也就是将ABC曲线近似作NBG直线看待,那么 $\sigma_K-\psi$ 曲线可用ONBG线近似地表示,左端与纵轴相交于N点,右端延长到 $\psi=100\%$ 处的G,这时应力—应变曲线的方程如下:

$$\sigma_K = \sigma_b + \tan \alpha \psi = \sigma_b + D\psi \quad (1-18)$$

式中 D ——形变强化系数,表示金属塑性变形时的强化能力。

上式也可写成