

实 验 力 学

赵德平 刘荣阁 主编

一九九八年五月

目 录

一、前言	1
二、绪论	2
第一章 材料机械性质实验	3
§ 1.1 万能材料实验机介绍	3
§ 1.2 材料的机械性质	8
§ 1.3 温度和时间对材料力学性能的影响	14
§ 1.4 材料的拉伸试验	15
实验报告(一) 金属材料的拉伸试验	17
§ 1.5 材料的压缩实验	19
实验报告(二) 铸铁材料的压缩实验	20
§ 1.6 材料的扭转实验	20
实验报告(三) 金属材料的扭转实验	24
§ 1.7 材料的冲击实验	25
§ 1.8 实验台圆杆构件材料剪切弹性模量 G 值的测定	28
实验报告(四) 测定实验台扭转杆材料的 G 值	29
第二章 电测静应变实验	30
§ 2.1 电测应变原理与电阻应变仪介绍	30
§ 2.2 电阻应变片的构造分类与粘贴技术	33
§ 2.3 静态应变的电测方法	35
§ 2.4 电阻应变仪桥路连接练习实验	37
实验报告(五) 电阻应变仪电桥连接实验	38
§ 2.5 几个基本电测静应力实验	39
1. 纯弯曲梁横截面上正应力分布规律实验	39
实验报告(六) 弯曲正应力实验	42
2. 平面应力状态一点主应力测定实验	43
实验报告(七) 主应力测试实验	45
3. 测定等强度梁的材料弹性模量 E 和泊松比 μ 的实验	46
实验报告(八) 悬臂梁材料 E 、 μ 弹性常数的测定	48
4. 材料弹性模量 E 和泊松比 μ 的电测法实验	48
实验报告(九) 电测法测定材料弹性模量 E 和泊松比 μ	50
第三章 光弹性实验与现代光弹测试技术	51
§ 3.1 概述	51
§ 3.2 光弹性实验的目的、光弹性实验的原理和装置	56
§ 3.3 光弹性法测定应力集中系数	58
§ 3.4 光弹贴片法实验	60

§ 3.5	全息光弹法测定主应力和	63
§ 3.6	全息光弹测定挠度	66
§ 3.7	散斑干涉法测定面内位移	67
第四章	机械振动测量	76
§ 4.1	概述	76
§ 4.2	几种常用的测振传感器	76
§ 4.3	振幅、速度、加速度和频率的测量	79
	实验报告(十) 测量振幅、速度和加速度及频率	81
§ 4.4	固有频率测量、幅频特性曲线和共振现象	82
	实验报告(十一) 固有频率测试、幅频特性曲线	84
§ 4.6	衰减振动实验	85
	实验报告(十二) 阻尼振动波型、幅频特性曲线	87
§ 4.7	悬臂梁振型节点测量、消极隔振	87
	实验报告(十三) 振型节点测试、隔振实验	90
第五章	实验数据的处理和测量误差分析	92
§ 5.1	测量误差及其分类	92
§ 5.2	误差正态分布定律	93
§ 5.3	直接测量的误差分析	94
§ 5.4	间接测量的误差分析	99
§ 5.5	系统误差与处理方法	103
§ 5.6	疏失误差与处理准则	106
第六章	试验计划、试验大纲与试验报告	107
§ 6.1	试验计划	107
§ 6.2	试验大纲	108
§ 6.3	试验报告	109

一、前 言

根据教学改革的精神，为培养和提高跨世纪大学生的素质，加强对学生能力的培养总结多年的教学实践，编写了本教材，它的内容包括四个部分：第一部分是材料的机械性质及实验设备的简介；第二部分是受力构件的应变实验与应力分析及所用仪器设备的简单介绍。第三部分是振动物体的振动性能分析与实验及仪器设备的简单介绍；第四部分是测量误差分析。其中第二部分中的光测应力分析及现代光弹技术的内容由刘荣阁撰写，其余部分内容由赵德平编写。最后由刘荣阁、赵德平统校。

二、绪 论

1. 实验力学任务与内容

用实验的手段和方法, 解决工程实际中的力学问题, 其中也包括一些力学量的测量, 例如振动物体的固有频率、振幅、速度、加速度、振动物体的振动特性; 检测工程材料的力学性能; 对受力构件进行应变测量及应力分析等。因此说它的应用面十分广泛, 延伸到各个工程领域: 建筑、机械、化工、造船、航空、道路、桥梁等等。

本实验力学所包括的实验内容有三大部分:

- (1) 材料机械性质的实验;
- (2) 受力构件的应变实验与应力分析;
- (3) 振体的振动性能实测与分析。

2. 力学实验的地位

实验是进行科学研究的重要方法, 科学史上许多重大发明是依靠科学实验而得到的, 许多新理论的建立也要靠实验来验证。

实验是科技工作者必须掌握的重要手段。重视实验、并不是说科学研究可以不重视理论研究, 而只是说科学研究不能以书本为基础, 而只能是以实验为基础。谁想致力于科学研究并取得成就, 谁就必须学会动手亲自作实验。

力学实验、是力学学科的重要环节, 通过这一教学环节使学生学到测定材料机械性质、应变、振动实验的基本知识、基本技能和基本方法, 了解实验应力分析的基本概念和初步掌握验证力学理论的方法。这对培养学生的动手能力和科学习惯都是十分重要的, 对培养学生的实际工作能力有重要意义。

力学实验在工程学科中有着极重要的地位, 首先对研究材料的力学性能, 材料对外力的抵抗能力及变形情况只有通过实验才能测定。其次是在建立新理论时, 只有用实验才能检验理论是否正确, 实践是检验真理的标准。再者实验可以解决尚无理论解的问题。当今实验已经发展成为独立学科——实验应力分析、振动测量与分析。它已经成为解决工程实际问题的主要途径之一。

当然, 实验在理论的指导下才不失方向性。在制定实验方案, 分析处理实验数据时必须依靠理论, 所以两者关系密切, 相互促进、相互补充。实践告诉我们, 没有实验的理论是空洞的, 没有理论实验是盲目的。

第一章 材料机械性质实验

§ 1.1 万能材料试验机介绍

万能材料试验机是材料力学实验室的主要设备，能兼作拉伸、压缩、剪切和弯曲等多种试验。各厂家生产的试验机、虽然牌号不同，型式各异，但其基本原理是相似的，按其传动和控制特点又可分为液压式、机械式、电子式等万能材料试验机，下面分别介绍。

1. 油压式万能材料试验机

油压式万能材料试验机的外观如图所示，虽然型号不同有所差异，但构造上基本大同小异。

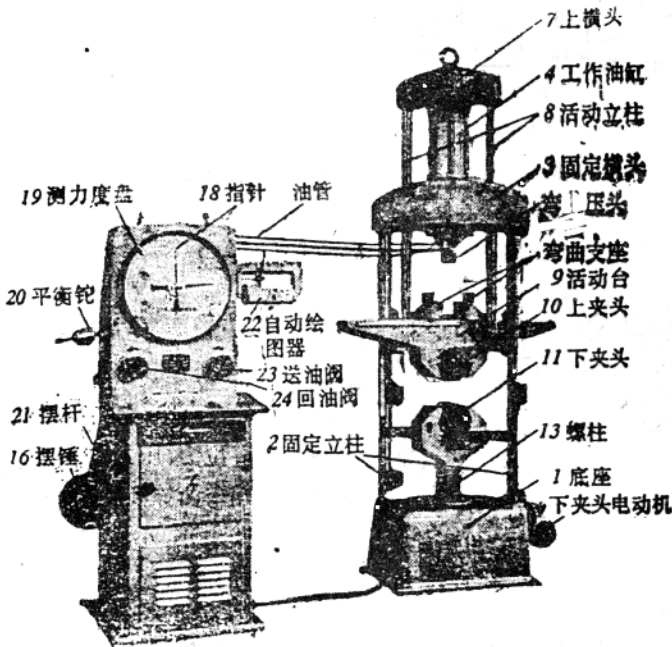


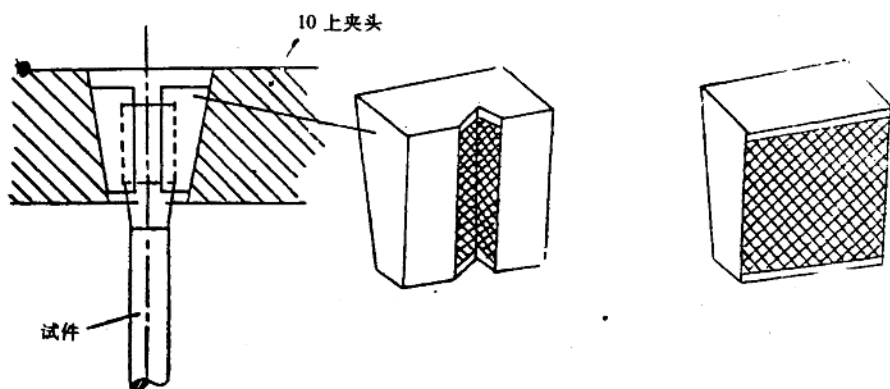
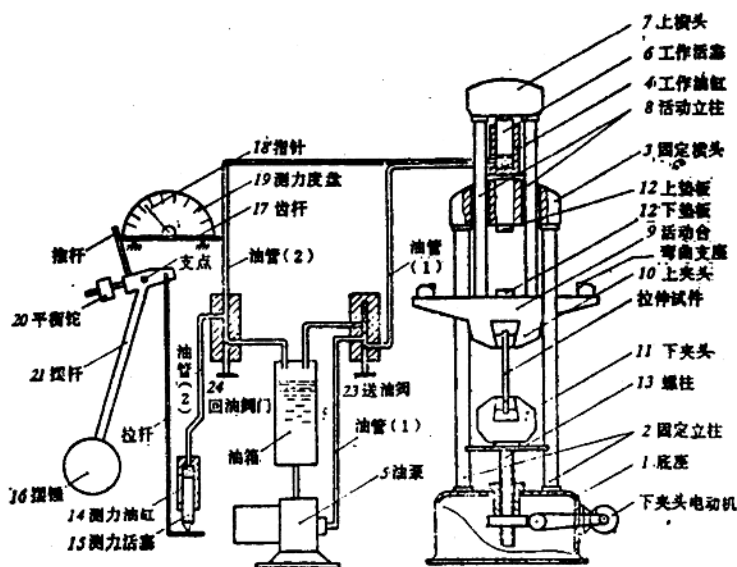
图 1-1 液压式万能试验机

油压式万能材料试验机的外貌和构造原理如图 1-1、1-2 所示。试验机的种类虽多、但其构造大体上都分以下几个部分：

(1) 试件装卡部分

拉伸试件装卡在上夹头 10 和下夹头 11 之间、把试件夹入楔形卡板中，如图 1-3 所示，随着试件受力的增加，楔形卡板横向夹紧力增大，这样就把试件夹牢。

压缩试件的装卡是把试件放置在试验机活动台 9 的中央上，并在试件的上下面分别放承垫和球形承垫。如图 1-4 所示，球形承垫的作用是当试件上下两端面稍有不平行时，能起自动调整作用，使压力通过试件轴线。而上下承垫 12、则使压缩试件与固定横头 3



和活动台 9 不直接接触, 以起到保护台面的作用。

做弯曲试验时如图 1-5 所示, 只要把受弯曲的试件放置在试验机活动台的支座上、调节两支座间的距离、再将 12 上垫板换上弯曲压头便可作弯曲实验。

做剪切试验时，是换上专用附件，（或自己设计的单剪、双剪装置）由拉或压来实现的。

(2) 加载部分

此部分的作用是使试件产生内力。参看图 1-2, 液压式万能实验机的加载部分是用油泵 5, 将高压油通过油管 (1) 压入工作油缸 4, 推动活塞 6 和上横头 7 向上移动。由活动立柱 8 带动活动台 9 同时向上移动, 若将试件装卡在上下夹头 10 和 11 中, 因下夹头固定不动, 当活动台上升时试件就承受拉力。若把试件放在活动台上、下垫板 12 之间, 当

活动台上升到试件与上垫板接触时试件就承受压力。输油管路中的送油阀门用来控制进入工作油缸中的油量，以调节对试件加载的速度。加载时回油阀置于关闭位置。回油阀打开时，则可将工作油缸中的油液泄回油箱，活动台由于自重而下降，回到原始位置。

(3) 测力部分

加载时，工作油缸中的油压推动活塞6的力与试件所受的力成正比。如果用油管(2)将工作油缸和测力油缸14联通，此油压便推动测力活塞15向下移动。使拉杆拉动摆锤16，使之绕支点转动而抬起，同时摆上的推杆便推动齿杆17，使齿轮和指针18转动。指针的旋转角度与油压成正比。亦与试件上所加载荷成正比，因此在测力度盘19上，便可读出试件受力的大小。

如果增加或减少摆锤的重量，指针虽然旋转同一角度，但所需的油压不同。这说明指针虽在同一位置，但所示出的载荷大小与摆锤的重量有关。注意加不同的摆锤时应该读相应的刻度盘。

(4) 操纵部分

试验机的操纵部分，通常由油泵马达和夹头升降马达的电钮开关及送油控制阀和回油阀等组成。开动油泵，关闭回油阀，打开送油阀，从油泵输来的高压油，通过送油控制阀来控制油的流量，从而改变活塞上升的速度，当试验完毕后，开启回油阀，使全部油液流回油箱，试验机活动台9降至最低位置。

(5) 自动绘图部分

在实验过程中，自动绘图装置能直接绘出试件所受的载荷 p 和变形 ΔL 的关系曲线。在加载时，推杆推动水平齿杆17带动指针18从而指示载荷的数值，水平齿杆的另一端附有绘图笔，故绘图笔在水平方向的移动就表示载荷的变化。自活动台连出的弦线通过几组导向轮，再绕过记录筒的线槽，末端系以小锤张紧弦线。当试件受力后产生变形时，其变形量由弦线传至记录筒并使之转动，绘图笔在转动的记录筒上所绘出的轨迹，即为试件所受载荷与变形的关系曲线。通常记录筒备有直径不同的几个线槽可将变形的实际尺寸按固定倍数放大，以供绘图时选择。

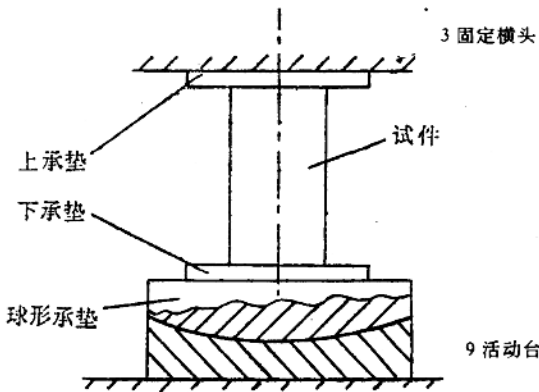


图 1-4

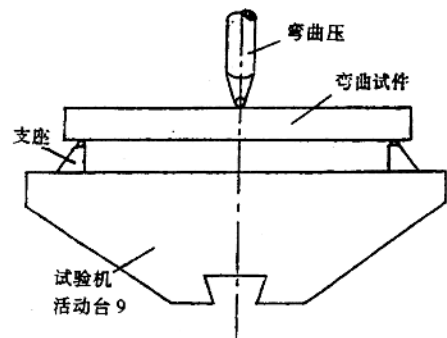


图 1-5

(6) 操作步骤

①检查油路上各阀门是否处于关闭位置；换上与试件相匹配的夹头；保险开关应当有效（限位安全开关）。

②根据所需最大载荷、选取测力度盘，装上相应的摆锤。

③安好自动绘图器的传动装置、笔和纸等。

④开动油泵电机、检查转动是否正常。然后关闭回油阀门，打开送油阀门，向工作油缸中缓慢输油，待活动台升1cm左右，将送油阀关到最小，调整17使测力指针和随动指针对准零点（加载时，测力指针带动随动指针转动；当卸载或试件断裂时测力指针迅速退回零位，而随动针则停留不动，示出卸载时或断裂时的最大载荷值。）而后便可打开送油阀进行加载实验。

⑤实验完毕后，关闭送油阀，并立即停机。缓慢打开回油阀，将油液泄回油箱，使活动台回到原始位置，并使一切机构复原。

(7) 注意事项

①开机前和停机后，送油阀一定要置于关闭位置。加载、卸载和回油均须缓慢进行。

②机器开动时，操纵者不得擅自离开。实验过程中不得触动摆锤。

③使用试验机时，听见异声或发生任何故障应立即停机。

2. 机械式（杠杆式）万能材料试验机

机械式万能材料试验机的外貌及构造原理如图1-6所示。它也可分下面几个部分：

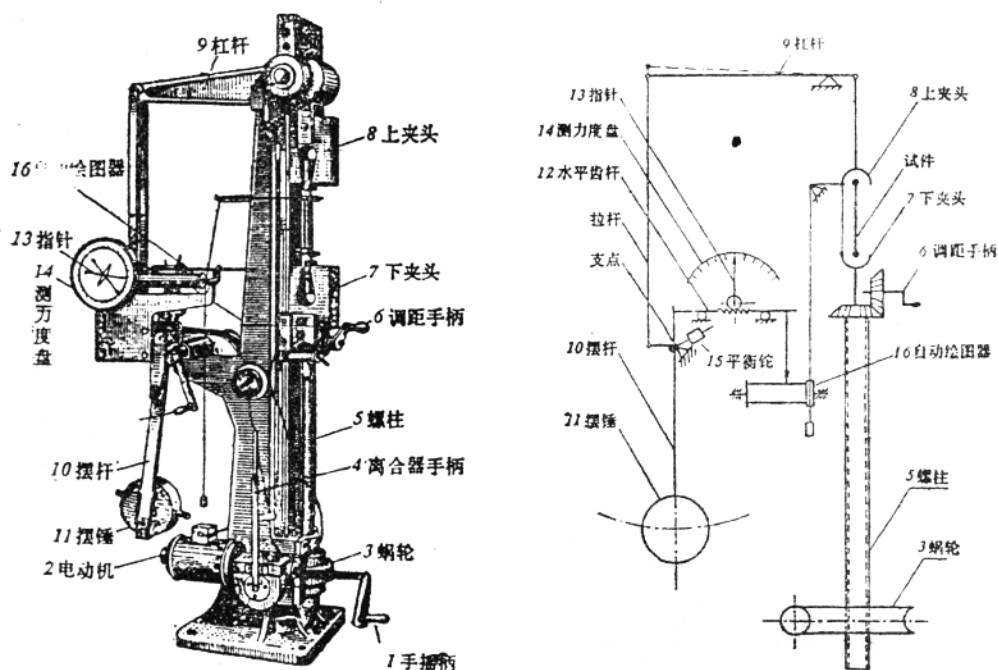


图1-6

(1) 加载部分

用手摇柄 1 或电动机 2 带动底座中蜗杆及蜗轮转动。使螺柱 5 向下移动，装在夹头中的试件便受拉力，如在夹头中安装相应转换器、则可作压缩、弯曲、剪切等试验。压缩试验转换器的结构示意图如图 1-7 所示。abcd 为一框架，efgh 为另一框架、试件放在 ab 与 ef 之间。在电动机 2 和蜗轮之间、装有变速机构，可用来调节加载速度。需要慢速加载时，可用手摇进行。在安装试件时，可摇动调距手柄 6，调节两夹头间的距离。

(2) 测力部分

试件变形时，作用上夹头 8 的力，通过杠杆 9 的传递，使摆锤 11 抬起。摆锤抬起时推动水平齿杆 12，使齿轮和指针 13 转动。指针转动的角度与试件所受的力成正比，所以由指针在测力盘 14 上的位置，便可示出试件受力的大小，利用增加或减少摆锤的重量及调整摆杆的长短来实现不同的加载范围。加载前用水平齿杆 12 调整指针对准零位。

16 为自绘图器、原理与油压式试验机相似。水平方向为力的大小，垂直方向为变形的大小。

(3) 操作步骤

这类试验机虽然在构造上与液压式试验机不同，但操作步骤大体相同。使用时可参照液压式试验机步骤进行。

(4) 注意事项

① 变更加载速度或改变下夹头移动方向时，应先停止电动机。用电动机加载时，必须先取下手摇柄 1。

② 调距手柄不用时，要用销子销住。调距手柄不能用来进行加载。

③ 使用完毕应将离合器手柄 4 放在“手摇”位置。

④ 机器运转时，操纵者不得擅自离开。实验时不得触动摆锤。

⑤ 使用时听见异声或发生故障应立即停机。

⑥ 手摇加载完毕后，手摇柄 1 必须取下。

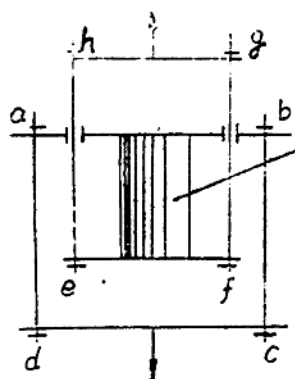


图 1-7 压缩试验转换器

3. 电子万能试验机介绍

这是一种采用电子技术控制的新型机械式万能材料试验机。它具有宽广准确的加载速度和测力范围，有较高的灵敏度和精确的载荷示值跟踪及速度变换装置，所以大大地提高了试验机的精度。拉伸试验的 $P-\Delta L$ 曲线或其它试验曲线均可以直接准确地由函数记录仪显示出来。配用电子计算机可进行数据处理和程序控制。试验机外形基本构造和原理如图 1-8 所示。

试验机主要由机械加载、控制系统、测量、显示等部分组成。机械加载部分为试验机主机，它由横梁 1、滚珠丝杠 2、活动台 3、机器底座 4、齿轮箱 5、及电动机 6 组成。横梁、丝杠、底座组成一框架、活动台用螺母与丝杠联结，当电动机转动时经齿轮箱的传递使丝杠旋转，活动台便可向上或向下移动。活动台向下移动时，在它的下空间可以进行压缩或弯曲实验，在它的上空间，即在上夹头 8 和下夹头 9 间装夹试件即可进行位伸试验。换上另外的夹具可进行低周疲劳和断裂力学等试验。

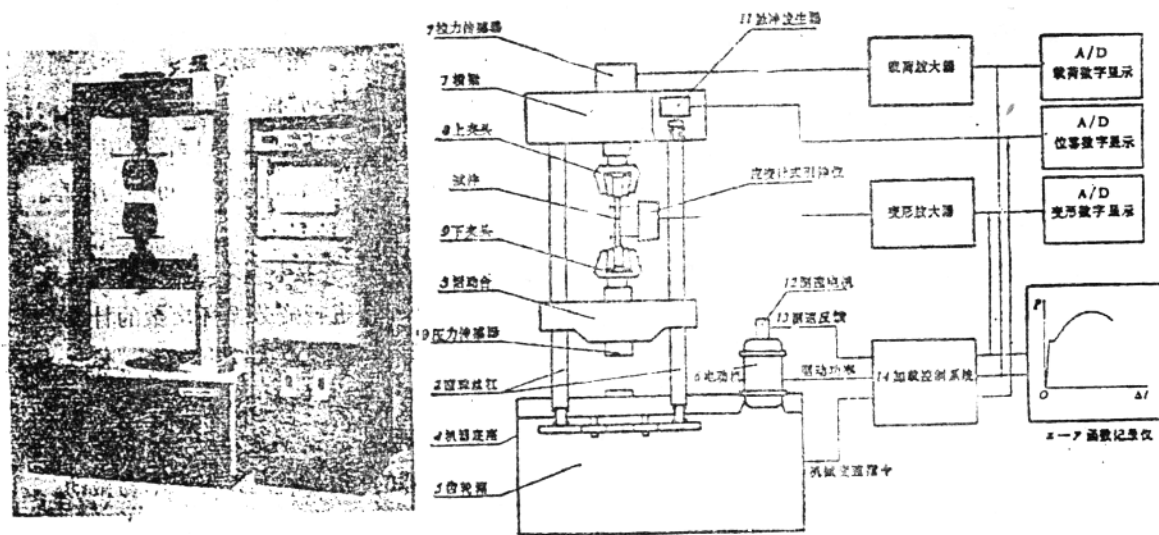


图 1-8 电子万能试验机基本构造和原理示意图

(1) 加载。首先操纵加载控制系统 14、改变直流电机的转速和齿轮箱的速比以进行速度调节，从而控制丝杆转动使活动台移动而进行加载。为了保证加载速度稳定，试验机采用了测速负反馈 13 实现了闭环控制。反馈信号由测速电机 12 产生。

载荷、位移、变形都采用了闭环控制系统，从而使载荷、位移和变形控制更加稳定。

(2) 载荷显示。载荷的大小（拉力或压力）由拉力或压力传感器感受载荷并转换成电信号，再经放大器放大送到 $x-y$ 函数记录仪进行记录，或进行模数转换由数字显示。进行拉力试验时，载荷传感器装置于框架的顶部并与上夹头相连接，以便感受拉伸载荷。进行压力或弯曲试验时，传感器装置于活动台下部、以便感受压缩载荷。

(3) 变形测量显示。将应变计式引伸仪装夹于试件上，当试件受力而变形时，引伸仪感受变形并转换成电信号，经放大器放大送到 $x-y$ 函数记录仪进行记录。或进行模数转换由数字显示。

(4) 活动台位移显示。活动台的位移量与丝杠的转动成正比，从而只要测取丝杠的转动便可得到活动台的位移量。它的测试方法是，由丝杠带动脉冲发生器发出与活动台位移成正比的电信号，送入 $x-y$ 记录仪记录，或进行模数转换由数字显示。

例如，进行位伸实验时，把载荷电信号输到 $x-y$ 仪的纵坐标，把变形或位移电信号输到 $x-y$ 仪的横坐标，即可自动地绘出如图 1-8 中所示的 $p-\Delta L$ 位伸曲线。

§ 1.2 材料的机械性质

构件是由各种材料制成的，材料不同、构件在受力时表现的变形也不一样，材料在载荷作用下表现出的变形直到破坏的特性称为材料的力学性能或称材料的机械性质。这些特性只能由实验来测定。一般是在室温下，以缓慢平稳的加载方式进行试验，称为常温静载

试验, 是测定材料力学性能的基本试验。为了便于比较不同材料的试验结果, 对试件的形状、加工精度、加载速度、试验环境等, 国家标准^① 都有统一规定。在试件上取长为 l 的一段 (图 1-9) 作为试验段, l 称为标距。对圆截面试样, 标距 l 与直径 d 有两种比例, 即

$$l = 5d \quad \text{和} \quad l = 10d \quad (a)$$

工程上常用的材料品种很多, 下面以低碳钢和铸铁为主要代表, 介绍材料拉伸时的力学性能。

1. 低碳钢拉伸时的力学性能

低碳钢是指含碳量在 0.3% 以下的碳素钢。这类钢材在工程中使用较广, 在拉伸试验中表现出的力学性能也最为典型。

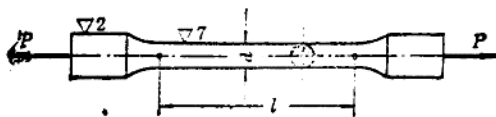


图 1-9

试件装在试验机上, 受到缓慢增加的拉力作用。对应着每一个拉力 P , 试件标距 l 有一个伸长量 Δl 。表示 P 和 Δl 的关系的曲线, 称为拉伸图或 $P-\Delta l$ 曲线, 如图 1-10 所示。

$P-\Delta l$ 曲线与试件的尺寸有关。为了消除试件尺寸的影响, 把拉力 P 除以试件横截面的原始面积 A , 得出正应力: $\sigma = \frac{P}{A}$; 同时, 把伸长量 Δl 除以标距的原始长度 l , 得到应变: $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ 。以 σ 为纵坐标, ϵ 为横坐标, 作图表示 σ 与 ϵ 的关系 (图 1-11) 称为应力-应变图或 $\sigma-\epsilon$ 曲线。

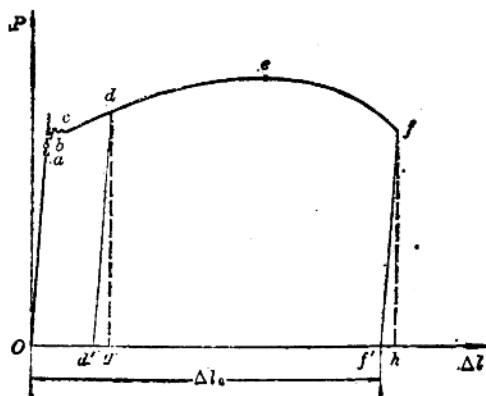


图 1-10

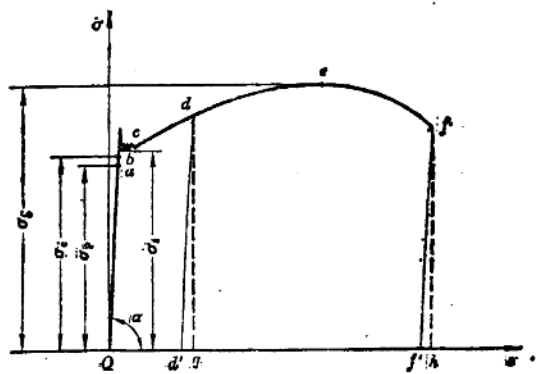


图 1-11

根据试验结果, 低碳的力学性能大致如下:

- (1) 弹性阶段 在拉伸的初始阶段, σ 与 ϵ 的关系为直线 Oa , 表示在这一阶段内, 应

^① 中华人民共和国国家标准《金属拉伸试验方法》(GB228-87)。

力 σ 与应变 ϵ 成正比, 即

$$\sigma \propto \epsilon \quad (b)$$

或者把它写成等式

$$\sigma = E\epsilon \quad (1.1)$$

这就是拉伸或压缩的胡克定律。^①

式中 E 为与材料有关的比例常数, 称为弹性模量。因为应变 ϵ 没有量纲, 故 E 的量纲与 σ 相同, 常用单位是吉帕, 记为 GPa ($1GPa = 10^9 Pa$)。公式(1.1)表明, $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ 而 $\frac{\sigma}{\epsilon}$ 正是直线 Oa 的斜率。直线部分的最高点 a 所对应的应力 σ_p 称为比例极限。显然, 只有应力低于比例极限时, 应力才与应变成正比, 材料才服从胡克定律。这时, 称材料是线弹性的。

超过比例极限后, 从 a 点到 b 点, σ 与 ϵ 之间的关系不再是直线, 但解除拉力后变形仍可完全消失, 这种变形称为弹性变形。 b 点所对应的应力 σ_e 是材料只出现弹性变形的极限值, 称为弹性极限。在 $\sigma-\epsilon$ 曲线上, a 、 b 两点非常接近, 所以工程上对弹性极限和比例极限并不严格区分。

在应力大于弹性极限后, 如再解除拉力, 则试件变形的一部分随之消失, 这就是上面提到的弹性变形。但还遗留下一部分不能消失的变形, 这种变形称为塑性变形或残余变形。

(2) 屈服阶段 当应力超过 b 点增加到某一数值时, 应变有非常明显的增加, 而应力先是下降, 然后作微小的波动, 在 $\sigma-\epsilon$ 曲线上出现接近水平线的小锯齿形曲线。这种应力基本保持不变, 而应变显著增加的现象, 称为屈服或流动。在屈服阶段内的最高应力和最低应力分别称为上屈服极限和下屈服极限。上屈服极限的数值与试件形状、加载速度等因素有关, 一般是不稳定的。下屈服极限则有比较稳定的数值, 能够反应材料的性能。通常就把下屈服极限称为屈服极限或屈服点, 用 σ_s 来表示。

表面磨光的试件屈服时, 表面将出现与轴线大致成 45° 倾角的条纹(图1-12)。这是由于材料内部相对滑移形成的, 称为滑移线。因为拉伸时在与杆轴成 45° 倾角的斜截面上, 剪应力为最大值, 可见屈服现象的出现与最大剪应力有关。



图1-12

材料屈服表现为显著的塑性变形, 而零件的塑性变形将影响机器的正常工作, 所以屈服极限 σ_s 是衡量材料强度的重要指标。

(3) 强化阶段 过屈服阶段后, 材料又恢复了抵抗变形的能力, 要使它继续变形必须增加拉力。这种现象称为材料的强化。在图1-

11中, 强化阶段中的最高点 e 所对应的应力 σ_b 是材料所能承受的最大应力, 称为强度极限或抗拉强度。它是衡量材料强度的另一个重要指标。在强化阶段中, 试件的横向尺寸有明显的缩小。

^① 根据老光的考证(见《力学与实践》1987年第一期), 我国东汉经学家郑玄(公元127-200年)在《周礼·考工记·弓人》注中, 指出弓的变形与加力的关系是: “每加物一石, 则张一尺”, 最早提出了变形与力成正比的关
系, 在时间上比胡克约早1500年。

(4) 局部变形阶段 过e点后, 在试件的某一局部范围内, 横向尺寸突然急剧缩小, 形成颈缩现象 (图 1-13)。由于在颈缩部分横截面面积迅速减小, 使试件继续伸长所需要的拉力也相应减少。在应力-应变图中, 用横截面原始面积 A 算出的应力 $\sigma = \frac{P}{A}$ 随之下降, 降落到 f 点, 试样被拉断。

(5) 延伸率和断面收缩率 试件拉断后, 由于保留了塑性变形, 试件长度由原来的 l 变为 l_1 。用百分比表示的比值

$$\delta = \frac{l_1 - l}{l} \times 100\% \quad (2.8)$$

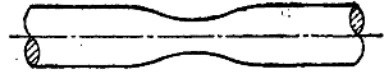


图 1-13

称为延伸率。试件的塑性变形 $(l_1 - l)$ 越大, δ 也就越大。因此, 延伸率是衡量材料塑性的指标。低碳钢的延伸率很高, 其平均值约为 20~30%, 这说明低碳钢的塑性性能很好。

工程上通常按延伸率的大小把材料分成两大类, $\delta > 5\%$ 的材料称为塑性材料, 如碳钢、黄铜、铝合金等; 而把 $\delta < 5\%$ 的材料称为脆性材料, 如灰铸铁、玻璃、陶瓷等。

原始横截面面积为 A 的试件, 拉断后颈缩处的最小横截面面积变为 A_1 , 用百分比表示的比值

$$\psi = \frac{A - A_1}{A} \times 100\% \quad (2.9)$$

称为断面收缩率。 ψ 也是衡量材料塑性的指标。

(6) 卸载定律及冷作硬化 如把试件拉到超过屈服极限的 d 点 (图 1-11), 然后逐渐卸除拉力, 应力和应变关系将沿着斜直线 dd' 回到 d' 点。斜直线 dd' 近似地平行于 Oa 。这说明: 在卸载过程中, 应力和应变按直线规律变化。这就是卸载定律。拉力完全卸除后, 应力-应变图中, $d'g$ 表示消失了的弹性变形, 而 Od' 表示不消失的塑性变形。

卸载后, 如在短期内再次加载, 则应力和应变大致上沿卸载时的斜直线 $d'd$ 变化, 直到 d 点后, 又沿曲线 def 变化。可见在再次加载时, 直到 d 点以前材料的变形是弹性的, 过 d 点后才开始出现塑性变形。比较图 1-11 中 $Oab c d e f$ 和 $d' d e f$ 两条曲线, 可见在第二次加载时, 其比例极限 (亦即弹性阶段) 得到了提高, 但塑性变形和延伸率却有所降低。这种现象称为冷作硬化。冷作硬化现象经退火后又可消除。

工程上经常利用冷作硬化来提高材料的弹性阶段。如起重用的钢索和建筑用的钢筋, 常用冷拔工艺以提高强度。又如对某此零件进行喷丸处理, 使其表面发生塑性变形, 形成冷硬层, 以提高零件表面层的强度。但另一方面, 零件初加工后, 由于冷作硬化使材料变脆变硬, 给下一步加工造成困难, 且容易产生裂纹, 往往就需要在工序之间安排退火, 以消除冷作硬化的影响。

2. 其他塑性材料拉伸时的力学性能

工程上常用的塑性材料, 除低碳钢外, 还有中碳钢、某些高碳钢和合金钢、铝合金、

青铜、黄铜等。图 1-14 中是几种塑性材料的 $\sigma - \epsilon$ 曲线。^① 其中有些材料，如 16Mn 钢，和低碳钢一样，有明显的弹性阶段，屈服阶段，强化阶段和局部变形阶段。有些材料，如黄铜 H62，没有屈服阶段，但其他三阶段却很明显。还有些材料，如高碳钢 T10A，没有屈服阶段和局部变形阶段，只有弹性阶段和强化阶段。

对没有明显屈服极限的塑性材料，可以将产生 0.2% 塑性应变时的应力作为屈服指标，并用 $\sigma_{p0.2}$ 来表示（图 1-15）。

各类碳素钢中，随含碳量的增加，屈服极限和强度极限相应提高，但延伸率降低。例如合金钢、工具钢等高强度钢材，屈服极限较高，但塑性性能却较差。

3. 铸铁拉伸的力学性能

灰口铸铁拉伸时的应力-应变关系

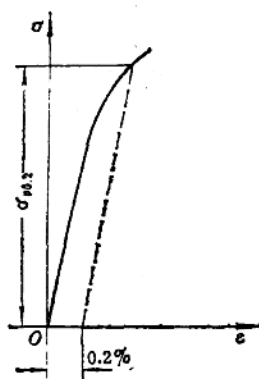


图 1-15

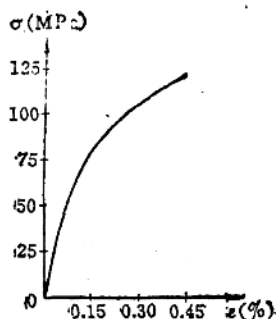


图 1-16

是一段微弯曲线，如图 1-16 所示，没有明显的直线部分。它在较小的拉应力下就被拉断，没有屈服和颈缩现象，拉断前的应变很小，延伸率也很小，灰口铸铁是典型的脆性材料。

由于铸铁的 $\sigma - \epsilon$ 图没有明显的直线部分，弹性模量 E 的数值随应力的变化而变。但在工程中铸铁的拉应力不能很高，而在较低的拉应力下，则可近似的认为服从胡克定律。通常取 $\sigma - \epsilon$ 曲线的割线代替曲线的开始部分；并以割线的斜率作为弹性模量，称为割线弹性模量。

铸铁拉断时的最大应力即为其强度极限。因为没有屈服现象，强度极限 σ_b 是衡量强

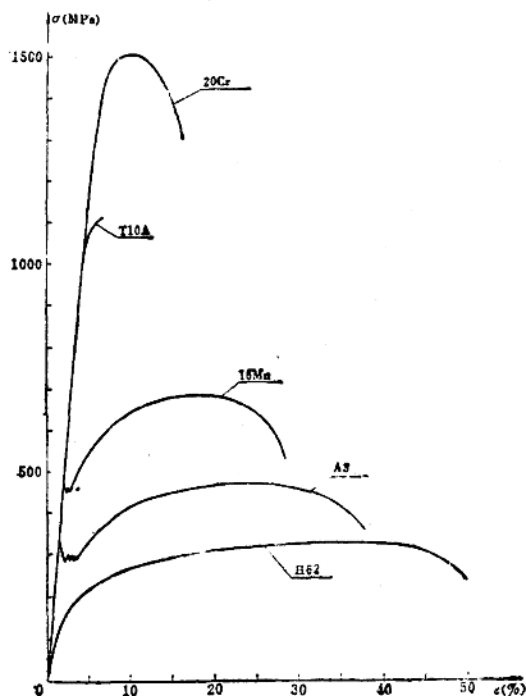


图 1-14

^① 在图 1-14 中，合金钢 20Cr，930℃ 水淬，180℃ 回火。高碳钢 T10A，790℃ 水淬，180℃ 回火。螺纹钢 16Mn，普通黄铜 H62，软态。

度的唯一指标。铸铁等脆性材料的抗拉强度很低，所以不宜作为抗拉构件的材料。

铸铁经球化处理成为球墨铸铁后，力学性能有显著变化，不但有较高的强度，还有较好的塑性性能。国内不少工厂成功地用球墨铸铁代替钢材制造曲轴、齿轮等零件。

4. 材料在压缩时的力学性能

金属的压缩试件一般制成很短的圆柱，以免被压弯。圆柱高度约为直径的 1.5~3 倍。混凝土、石料等则制成立方形的试块。

低碳钢压缩时的 $\sigma-\epsilon$ 曲线如图 1-17 所示。试验表明：低碳钢压缩时的弹性模量 E 和屈服极限 σ_s ，都与拉伸时大致相同。屈服阶段以后，试件越压越扁，横截面面积不断增大，试件抗压能力也继续增高，因而得不到压缩时的强度极限。由于可从拉伸试验测定低碳钢压缩时的主要性能，所以不一定要进行压缩试验。

图 1-18 表示铸铁压缩时的 $\sigma-\epsilon$ 曲线。试件仍然在较小的变形下突然破坏。破坏断

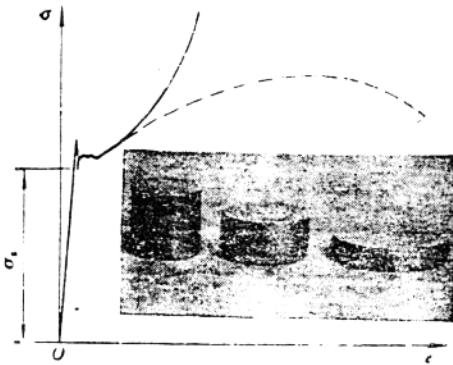


图 1-17

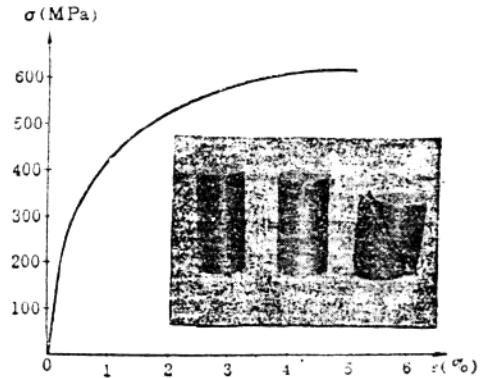


图 1-18

面的法线与轴线大致成 $45^\circ \sim 55^\circ$ 的倾角^①，表明试样沿斜截面因相对错动而破坏。铸铁的抗压强度极限比它的抗拉强度极限高 4~5 倍。其他脆性材料，如混凝土、石料等，抗压强度也远高于抗拉强度。

脆性材料抗拉强度低，塑性性能差，但抗压能力强，且价格低廉，宜于作为抗压构件的材料。铸铁坚硬耐磨，易于浇铸成形状复杂的零部件，广泛用于铸造机床床身、机座、缸体及轴承座等受压零部件。因此，其压缩试验比拉伸试验更为重要。

综上所述，衡量材料力学性能的指标主要有：比例极限（或弹性极限） σ_p 、屈服极限 σ_s 、强度极限 σ_b 、弹性模量 E 、延伸率 δ 和断面收缩率 ψ 等。对很多金属来说，这些量往往受温度、热处理等条件的影响。表 1.1 中列出了几种常用材料在常温、静载下 σ_s 、 σ_b 和 δ 的数值。

^① 某些塑性材料，如铝合金、铝青铜等，压缩时也是沿斜截面破坏，并非都像低碳钢一样压成扁饼。

表 1.1 几种常用材料的主要力学性能

材料名称	牌 号	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	$\delta_5\%$ ①
普通碳素钢	A3	216~235	373~461	25~27
	A5	255~275	490~608	19~21
优质碳素结构钢	40	333	569	19
	45	353	598	16
普通低合金结构钢	16Mn	274~343	471~510	19~21
	15MnV	333~412	490~549	17~19
合金结构钢	20Cr	539	843	10
	40Cr	785	981	9
碳素铸钢	ZG35	275	490	16
可锻铸铁	KTZ45-5	275	441	5
球墨铸铁	QT45-5	324	441	5
灰铸铁	HT15-33		拉 98.1~274 压 637	

注：①表中 δ_5 是指 $l=5d$ 的标准试样的延伸率。

②表中单位已由原标准中的公制 换算成国际制。

* § 1.3 温度和时间对材料力学性能的影响

前面两节讨论了材料在常温、静载下的力学性能。但也有些零件，例如汽轮机的叶片，长期在高温中运转；又如液态氢或液态氮的容器，则在低温下工作。材料在高温和低温下的力学性能与常温下并不相同，且往往与作用时间的长短有关。现在简略介绍温度和时间对材料力学性能的影响。

1. 短期静载下，温度对材料力学性能的影响

为确定金属材料在高温下的性能，可对处于一定温度下的试件进行短期静载拉伸试验，例如在 15 或 20 分钟内拉断的试验。图 1-19 表示在高温短期静载下，低碳钢的 σ_s 、 σ_b 、 E 、 δ 、 ψ 等随温度变化的情况。从图线可以看出， σ_s 和 E 随温度的增高而降低。在 $250^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ 之前，随温度的升高， δ 和 ψ 降低而 σ_b 增加；在 $250^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ 之后，随温度的升高， δ 和 ψ 增加而 σ_b 降低。

在低温情况下，碳钢的弹性极限和强度极限

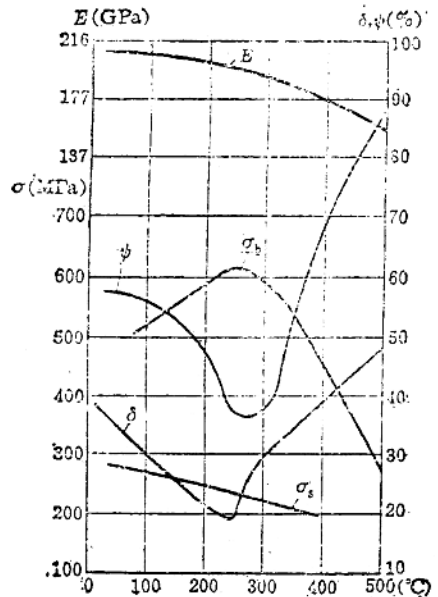


图 1-19