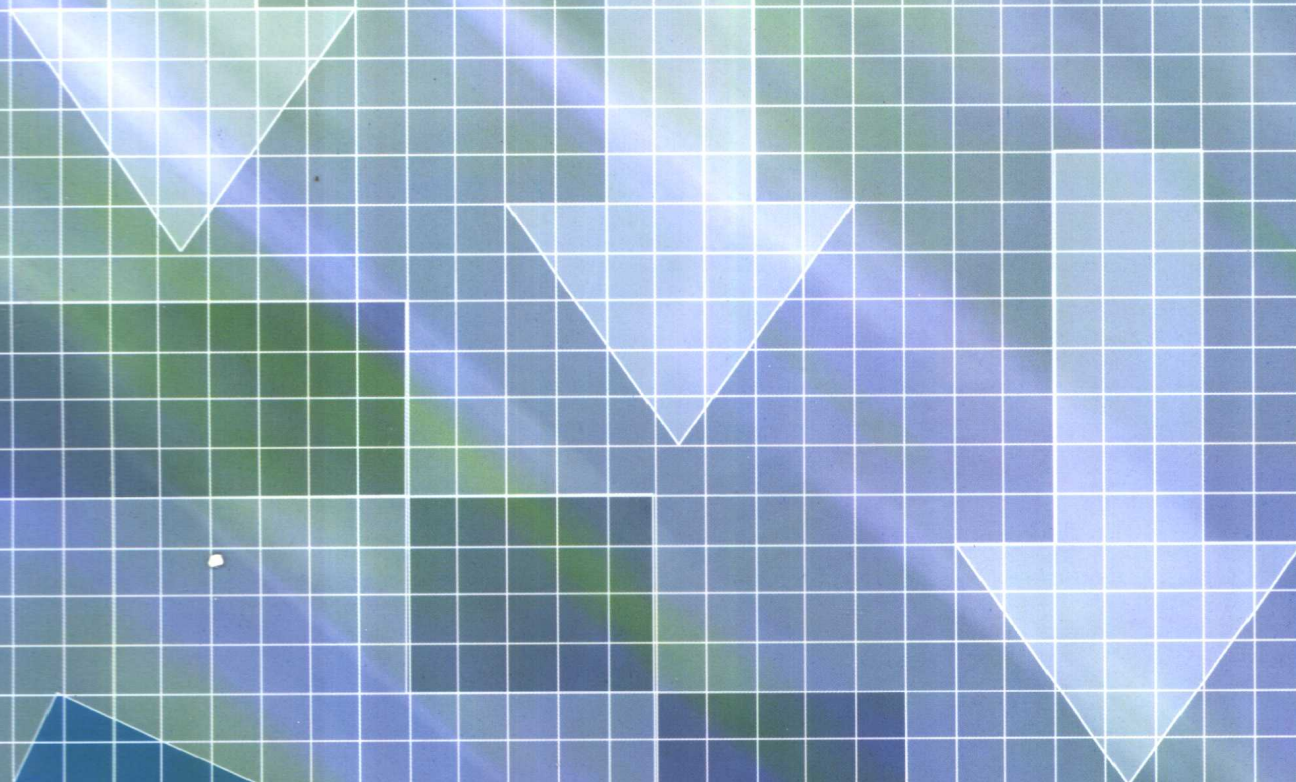




材料力学教学实验

(第二版)

同济大学基础力学教研室材力组 编



同济大学出版社

材料力学教学实验

(第二版)

同济大学基础力学教研室材力组 编

同济大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

材料力学教学实验(第二版)/同济大学基础力学教研室材力组
编. —2版. —上海:同济大学出版社,2002.1
ISBN 7-5608-2297-5

I. 材… II. 同… III. 材料力学-实验-高等学校-
教学参考资料 IV. TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 039977 号

材料力学教学实验(第二版)

作 者 同济大学基础力学教研室材力组

责任编辑 解明芳 责任校对 郁 峰 装帧设计 陈益平

出 版
发 行

同济大学出版社

(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 6.25

字 数 160000

版 次 2002 年 1 月第 2 版 2002 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5608-2297-5/O·195

定 价 10.00 元



本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

内容提要

本书是在同济大学材料力学教研室于 1994 年编写的《材料力学教学实验》的基础上经局部修改而成。全书共分四个部分:绪论;基本实验;附录(包括实验数据处理,国标中 E, G 的测试方法,临界力 P_{cr} 的计算方法);实验报告。

本书可作为高等工业学校土建、机械、水利、航空、造船、动力、采矿和电机等专业材料力学课的实验教材。

第二版前言

本教材是在同济大学材料力学教研室于 1994 年编写的《材料力学教学实验》一书的基础上经局部修改、更新而成。书中删改最多的地方是涉及 YJ-5 型电阻应变仪之处,均以 YJR-5A 和 YJ-18 应变仪取代。

书中包括的实验内容是同济大学全校各高学时专业材料力学课程中所开的实验内容。对于学时较少的专业采用本教材时,只要从中选择相关实验即可。

在本书第一版的编写过程中,李宗榕教授仔细地审阅了大部分书稿,提出了许多改进意见。这次修改过程中,基础力学教研室材力组全体教师为本书提出了不少宝贵的意见,并得到基础力学教研室副主任虞爱民副教授的关心和支持。

本书编写者有:李君实(第二章基本实验 1,2,3,9 及附录 II)、陈和(第二章基本实验 5,6,7)、王慧萍(第二章基本实验 4,8)、周润玉(绪论、附录 I)、蔡文安(附录 III),全书由周润玉主编。由于编者水平有限,书中难免有欠缺和错误之处,请广大读者批评指正。

编 者

2001 年 4 月

第一版前言

本教材是在同济大学材料力学教研室编写的《材料力学实验讲义》基础上修订、充实而成。书中包括的实验内容是同济大学全校各高学时专业材料力学课程中所开的实验内容;书中介绍的试验机器、量测仪表也是以同济大学材料力学试验室目前所拥有的设备为基础。因此,本书汇集了同济大学材料力学课实验教学的经验和特点,反映了同济大学当前材料力学实验教学的现状。

书中所述的名词、术语和测试方法,原则上以国家标准为依据,鉴于国内材料力学教科书与国标存在有较大的差异。为此,其中名词、术语部分以注解说明;测试方法部分在附录中列出详细说明。

在本书编写过程中,李宗珩教授仔细审阅了大部分书稿,提出了许多改进意见,在此致以衷心的感谢。

参加本书编写的人员有李君实(实验 1,2,3,9 及附录 II)、陈和(实验 5,6,7)、王慧萍(实验 4,8)、周润玉(绪论、附录 I)、蔡文安(附录 III),全书由周润玉主编。由于编者水平有限,书中难免有欠缺和错误之处,请广大读者批评指正。

编 者

1993 年 5 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第二章 基本实验	(3)
§ 2-1 拉伸与压缩试验	(3)
§ 2-2 拉伸弹性模量(E)测定实验	(12)
§ 2-3 扭转试验	(22)
§ 2-4 梁弯曲正应力实验	(30)
§ 2-5 弯曲与扭转组合变形实验	(33)
§ 2-6 电阻应变片的接桥方法实验	(37)
§ 2-7 压杆稳定实验	(40)
§ 2-8 冲击试验	(43)
§ 2-9 疲劳试验(演示)	(48)
附录	(56)
附录 I 实验数据处理	(56)
附录 II 线性回归法计算拉伸弹性模量 E (即拉伸杨氏模量 E_1) 和剪切弹性模量 G (即切变模量 G)	(63)
附录 III 测定压杆临界力 P_{cr} 的计算方法	(65)
参考文献	(68)
实验报告	(69)
I 拉伸和压缩试验报告	(69)
II 拉伸弹性模量 E 测定实验报告	(73)
III 扭转破坏试验报告	(75)
IV 剪切弹性模量 G 测定实验报告	(77)
V 梁弯曲正应力实验报告	(79)
VI 弯曲与扭转组合变形实验报告	(83)
VII 应变片接桥练习报告	(87)
VIII 压杆稳定实验报告	(89)

第一章 绪 论

一、材料力学实验的作用

材料力学实验是材料力学课程的组成部分。材料力学的结论和理论公式的验证,材料的力学性能测定,都有赖于实验手段。工程上,有很多实际构件的形状和受荷载情况较为复杂,此时,应力分析在理论上难以解决,也需通过实验手段来解决。材料力学的发展历史就是理论和实验二者最好的融合。

材料力学实验课的目的是:

1. 熟悉了解常用机器、仪器的工作原理和使用方法,掌握基本的力学测试技术。
2. 测定材料的力学性能,观察受力全过程中的变形现象和破坏特征,以加深对建立强度破坏准则的认识。
3. 验证理论公式,巩固和深刻理解课堂中所学的概念。
4. 对实验应力分析方法有一个初步的了解。

二、实验须知

1. 实验前,必须认真预习,了解本次实验的目的、内容、实验的步骤,并了解所使用的机器、仪器的基本原理。
2. 要按课程表指定的时间进入实验室,完成规定的实验项目,因故不能参加者应取得教师同意并安排补做。
3. 在实验室内,应自觉地遵守实验室规则及机器、仪器的操作规程,非指定使用的机器、仪器不能任意乱动。
4. 实验时要严肃认真,相互配合,密切注意观察实验现象,记录全部所需测量的数据。
5. 按规定日期,携同原始记录,每人交实验报告一份。字迹要求整齐、清晰,数据书写要求用印刷体,问题回答要独立思考完成,不允许抄袭。

三、实验报告的书写

实验报告是实验者最后交出的成果,是实验资料的总结。实验报告应当包括下列内容:

1. 实验名称,实验日期,当时的温度,实验者及组员姓名。
2. 实验目的、原理、装置。
3. 使用的机器、仪器,应注明名称、型号、精度(或放大倍数)等。
4. 实验数据及其处理

在记录纸上应制成表格,填入测量数据。填表时,要注意测量单位,此外,还要注意仪器本身的精度。

5. 计算

在计算中所用到的公式均须明确列出,并注明公式中各种符号所代表的意义。

运用计算器计算时,须注意有效数字的问题,如试件直径 d 的测量平均值为 9.98mm ,则横截面积 A 取 78.2mm^2 即可。

6. 结果的表示

在实验中,除根据测得的数据整理并计算实验结果外,一般还要采用图表或曲线来表达实验的结果。曲线均应绘在方格纸上,图中应注明坐标轴所代表的物理量及比例尺。实验的坐标点应当用记号标出,例如,“ $\times$ ”,“ $\triangle$ ”,“ $\circ$ ”,“ $\bullet$ ”等。当连接曲线时,不要用直线逐点连成折线,应当根据多数点的所在位置,描绘成光滑的曲线。

7. 对实验结果的分析

说明本实验的优缺点、主要结果是否正确,以及对误差加以分析,并回答指定的思考问题。

第二章 基本实验

§ 2-1 拉伸与压缩试验

拉伸试验是对试件施加轴向拉力,以测定材料在静荷载作用下的力学性能的试验。它是材料力学最基本、最重要的试验之一。拉伸试验简单、直观、技术成熟、数据可比性强,它是最常用的试验手段。由此测定的材料力学性能指标,成为考核材料的强度、塑性和变形能力的最基本的依据,被广泛而直接地用于工程设计、产品检验、工艺评定等方面。有些材料的受压力学性能和受拉力学性能不同,所以,要对其施加轴向压力,以考核其受压性能,这就是压缩试验。

一、试验目的

1. 通过对低碳钢和铸铁这两种不同性能的典型材料的拉伸、压缩破坏过程的观察和对试验数据、断口特征的分析,了解它们的力学性能特点。
2. 了解万能试验机的构造、原理和操作。
3. 测定低碳钢拉伸时的屈服极限 σ_s (或下屈服极限 σ_{sL}), 强度极限 σ_b , 延伸率 δ_{10} , 截面收缩率 ψ ; 压缩时的压缩屈服极限 σ_{sc} , 铸铁拉伸、压缩时的强度极限 σ_b, σ_{bc} ①。

二、试件

为了使试验结果具有可比性,且不受其他因素干扰,试验应尽量在相同或相似的条件下进行,国家为此制定了试验标准,其中包括对试件的规定。

1. 试件制备

拉伸试验的试件又分比例试件和定标距试件两种。比例试件是指按相似原理,原始标距 l_0 与试件截面积平方根 $\sqrt{A_0}$ 有一定的比例关系,即 $l_0 = k\sqrt{A_0}$, k 取 5.65 或 11.3,前者称短比例试件,后者称长比例试件,并修约到 5mm, 10mm 的整倍数长。对圆试件,二者的 l_0 则分别为 $l_0 = 5d_0, l_0 = 10d_0$ 。一般推荐用短比例试件。定标距试件是指取规定 l_0 长度,与 $\sqrt{A_0}$ 无比例关系。

本试验取长比例圆试件。图 1-1 为一种圆试件图样,试件头部与平行部分要过渡缓和,以减少应力集中,其圆弧半径 r 依试件尺寸、材质和加工工艺而定,而 $d_0 = 10\text{mm}$ 的圆试件, $r > 4\text{mm}$ 。试样头部形状依试验机夹头形式而定,要保证拉力通过试件轴线,不产生附加弯矩,其长度 H ,至少为楔形夹具长度的 $3/4$ 。中部平行长度 $L_c > l_0 + d_0$ 。为测定延伸率 δ ,要

① 这些性能术语在国家标准 GB228-87, GB7314-87 中为:屈服点 σ_s 、上屈服点 σ_{su} 、下屈服点 σ_{sL} 、抗拉强度 σ_b 、断后伸长率 δ_{10} 、断面收缩率 ψ 、压缩屈服点 σ_{sc} 、抗压强度 σ_{bc} 。

在试件上标出原始标距 l_0 ，可采用划线或打点法，标出一系列等分格标记。

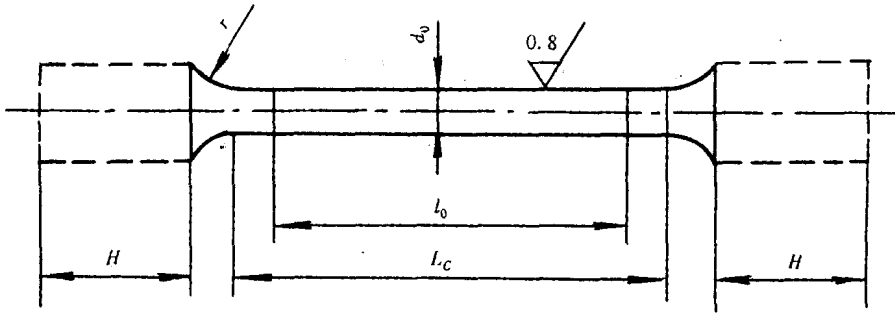


图 1-1 拉伸圆试件

压缩试验的试件有圆柱形、正方柱形和板状三种。本试验取圆柱形。为了既防止试件压弯，又使试件中段为均匀单向压缩（距端面小于 $0.5d_0$ 内，受端面摩擦力影响，应力分布不是均匀单向的），其长度 L 限制为 $L=(2.5\sim3.5)d_0$ ，或 $L=(1\sim2)d_0$ 。为防止偏心受力引起的弯曲影响，对两端面的不平行度及它们与圆柱轴线的不垂直度也有一定要求。图 1-2 为圆柱形试件图样。

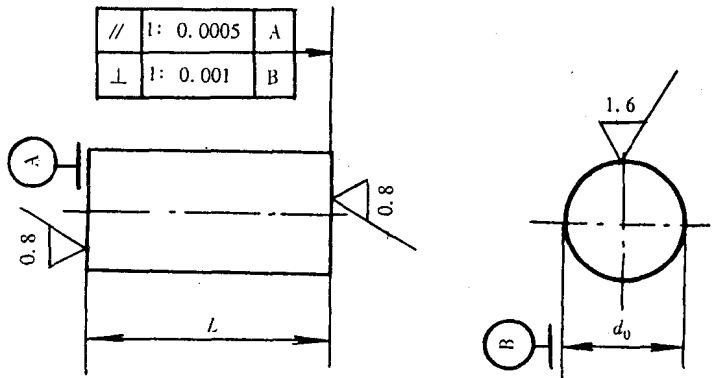


图 1-2 圆柱形压缩试件

2. 试件尺寸量测

对拉伸试件，取标距的两端和中间共三个截面，每个截面量测相互垂直的两个直径，取二者的算术平均值为平均直径，取三个平均直径中最小者计算原始横截面积 A_0 。

对压缩试件，量测长度一次，量测中间截面相互垂直的两个直径，取二者的算术平均值计算原始横截面积 A_0 。

本试验用最小分度值为 0.02mm 的游标卡尺为量具。

三、万能试验机简介

1. 构造原理

万能试验机有机械螺杆加载和液压加载等几种。液压式的万能试验机的外形和构造如

图 1-3、图 1-4 所示。其结构分三部分。

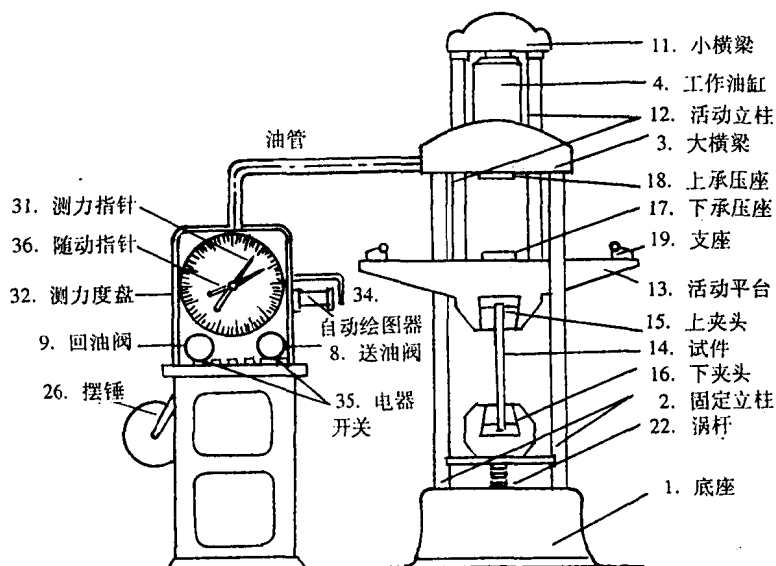


图 1-3 液压式万能试验机外形图

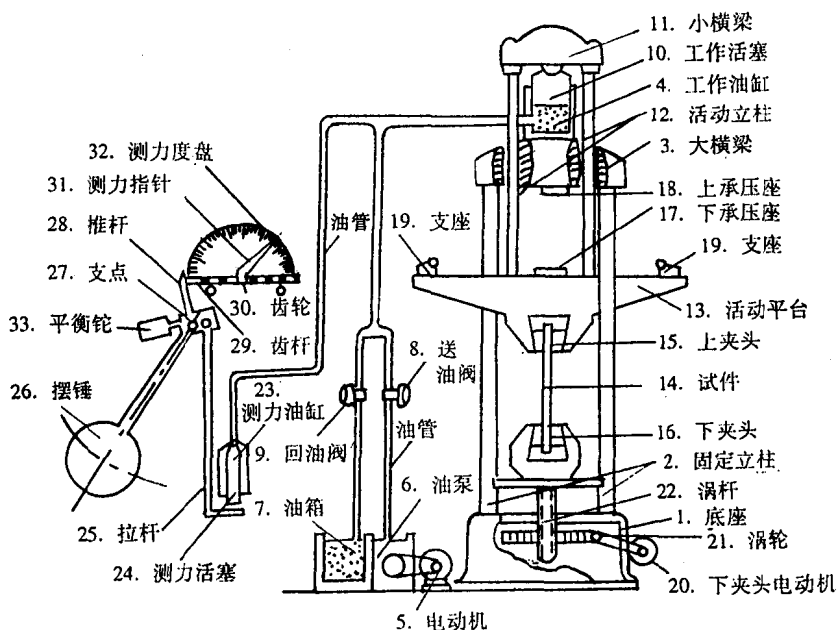


图 1-4 液压式万能试验机结构原理图

(1) 加力部分

底座 1、两个固定立柱 2、大横梁 3 构成刚性很大的机架。大横梁上固定着工作油缸 4，当加力时，液压推动活塞向上顶起小横梁 11，并通过两个活动立柱 12 带动活动平台 13 上升，于是，在活动平台上部形成缩小的加力空间，可做压缩试验；在活动平台下部形成增大的

加力空间,可做拉伸试验。可见,试验机的基本加载方式是拉和压,若要做其他形式的加载试验,如弯曲、剪切、拔出、压入等,可通过增加附属装置完成。

在拉伸空间,有上、下两个夹头,用来夹持拉伸试件。夹头有各种形式,常用的夹头是在梯形开口的上、下夹座内各有两块楔形夹块,楔面与梯形斜面接触,如图 1-5 所示。两夹块相对端上有硬齿,以抓紧试件两端。当施加分离上、下夹头的垂直力 P 时, P 被倾斜接触面分解成对夹块的水平夹持力 F ,随着 P 增大, F 亦增大,保证夹紧试件而不滑动。

为了调整两夹头之间的拉伸空间,可通过涡轮蜗杆机构调节下夹头上下移动,或提升活动平台增大空间距离。压缩空间的调整,可通过加垫块或提升活动平台完成。注意活动平台不要靠液压提升过高,否则,会使活塞过量伸出,使油缸工作状态不利;而且,对拉伸试验来说,可能会出现变形余地不够的情况。

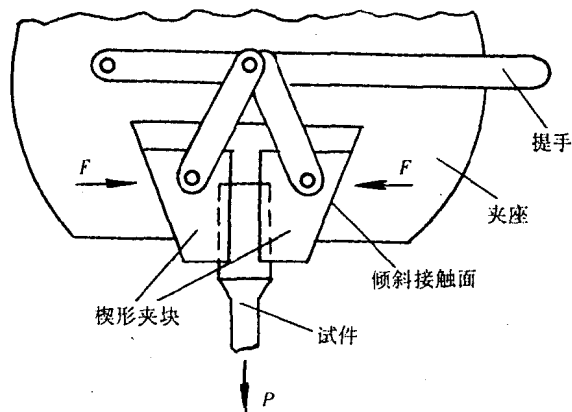


图 1-5 上夹头结构

(2) 操作部分

操作部分由进油阀、回油阀和油泵开关等组成。进油阀打开,油缸进油加载,进油阀开得越大,加载速度越快。回油阀打开,回油卸载。操作时,注意开机试验前要关闭进、回油阀,开机后,再平缓地打开进油阀,逐渐增大进油量。否则,若在进油开口较大时开机,荷载突然增大,会引起冲击,甚至冲过屈服点或使试件迅速破坏,指针受过大动惯性影响,使无法准确测读力值。

(3) 测力部分

测力油缸 23 和工作油缸连通,这样,两个密闭体的油压随时相等。当油压增大(即荷载增大)时,测力油缸活塞向下顶,使拉杆 25 向下拉,通过杠杆机构拉动摆锤 26 摆起。油压越大,摆得越高,即力臂越长,平衡力矩亦越大。摆锤上部推动水平齿杆 29 移动正比于力臂长度的距离,齿杆带动齿轮 30 使测力指针 31 转过正比于力臂长度的角度。以上各量,均成正比。将测力盘按力值比例刻度,测力指针的位置即指示出荷载读数。

通过改变摆锤重量(有些机器还可改变摆锤杆长度),可得到不同的测力范围量程,并分别按相应比例刻度在测力盘上。根据试件尺寸、强度,选择好适当的力值量程(一般,极限荷载在量程的 25%~80%内),并调整好对应的摆锤重量(或摆杆长度)。

摆锤还设有阻尼装置,可调节增加其摆动阻力,其目的之一是使摆锤回零时一次到位,以免摆动不停而耽误时间;二是不使与摆锤会联动的测力指针过于敏感,以免受油压波动影

响而摆动,不利于读取即时力值。

测力盘另有随动指针,它由测力指针带动向前。当试件破坏后,荷载为零,测力指针回到零位,随动指针仍停留在破坏位置,我们就能方便地保留峰值。试验前,要拨动随动指针向测力指针靠拢。

测力部分还有绘图装置 34,它有与活动平台联动的记录纸和与测力指针联动的记录笔,二者的运动方向垂直。当记录笔与记录纸接触就位后,在试验过程中,就能自动绘出荷载 P 和位移 ΔL 的曲线。

2. 操作顺序和要领

- (1) 选择适当的力值量程,并换好对应摆锤。
- (2) 调节机器零位。分三个步骤:首先,开机送油,使活动平台略抬,以扣除平台重力,使测力指针位置表示试件上的纯荷载。其次,使摆锤垂直,可调节摆锤上的平衡锤,改变摆锤重心,使标记线对齐。最后,调整测力指针对准零刻度。
- (3) 调整加力空间以适应试件尺寸,安装试件。
- (4) 拨回随动指针与测力指针靠拢,使绘图装置纸笔就位,笔要处于零线位置,且保持适当压力。
- (5) 加载试验,读取试验数据。加载时,眼观测力指针,手控进油阀,平滑地调节进油量,使指针匀速转动。注意,不能用下夹头的调位电机给拉伸试件加载,以免电机超荷损坏。
- (6) 完成试验,脱开绘图装置纸笔,回油,使活动平台复位,取下破坏的试件,以备再次试验。

四、低碳钢拉伸的 $P-\Delta L$ 曲线

以拉力 P 为纵坐标、伸长 ΔL 为横坐标,所绘出的试验曲线图形称为拉伸图,即 $P-\Delta L$ 曲线。普通试验机绘出的曲线图形虽然精度不足以定量,但能定性地看出材料的力学特性。

典型的低碳钢的拉伸 $P-\Delta L$ 曲线,可明显分为四个阶段(图 1-6)。

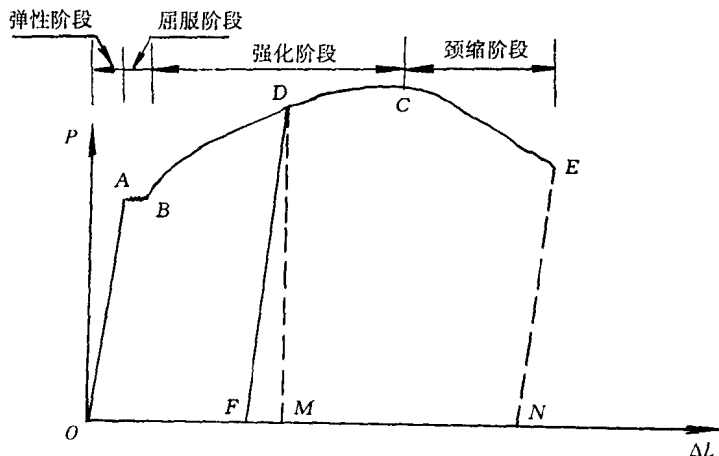


图 1-6 低碳钢拉伸 $P-\Delta L$ 曲线

1. 弹性阶段

拉伸初始阶段(OA段)为弹性阶段,在此阶段若卸载,记录笔将沿原路返回到O点,变形完全消失,即弹性变形是可恢复的变形。特别是其前段,力 P 与变形 ΔL 成正比关系,为斜直线。

2. 屈服阶段

试验进行到A点以后,在试件继续变形情况下,力 P 却不再增加,或呈下降,甚至反复多次下降,使曲线呈波形。若试件表面加工光洁,可看到 45° 倾斜的滑移线。这种现象称为屈服,即进入屈服阶段(AB段)。其特征值屈服极限 σ_s 表征材料抵抗永久变形的能力,是材料重要的力学性能指标。

3. 强化阶段

过了屈服阶段(B点),力又开始增加,曲线亦趋上升,说明材料结构组织发生变化,得到强化,需要增加荷载才能使材料继续变形。随着荷载增加,曲线斜率逐渐减小,直到C点,达到峰值,该点为抗拉极限荷载,即试件能承受的最大荷载。此阶段(BC段)称强化阶段,若在强化阶段某点D卸去荷载,可看到记录笔沿与弹性阶段(OA)近似平行的直线(DF),降到F点;若再加载,它又沿原直线(DF)升到D点,说明亦为线弹性关系,只是比原弹性阶段提高了。D点的变形可分为两部分,即可恢复的弹性变形(FM段)和残余(永久)的塑性变形(OF段)。这种在常温下冷拉过屈服阶段后呈现的性质,称冷作硬化,常作为一种工艺手段,用于工程中以提高金属材料的线弹性范围。但此工艺亦同时削弱了材料的塑性,如图1-6所示,冷拉后的断后伸长(FN)比原来的断后伸长(ON)减少了。这种冷作硬化性质,只有经过退火处理,才能消失。

4. 颈缩阶段

试验达到D点后,试件出现不均匀的轴线伸长,在其某薄弱处,截面明显收缩,直到断裂,称颈缩现象。因截面不断削弱,承载力减小,曲线呈下降趋势,直到断裂点E,该阶段(CE段)为颈缩阶段。颈缩现象是材料内部晶格剪切滑移的表现。

五、拉伸、压缩力学性能的试验定义和测定

1. 屈服极限 σ_s 、上屈服极限 σ_{su} 、下屈服极限 σ_{sl} 、压缩时屈服极限 σ_{sc}

在屈服阶段,若荷载是恒定的(图1-7(a)),则此时的应力称屈服极限 σ_s ;若荷载下降或波动,则首次下降前的最大应力为上屈服极限 σ_{su} (图1-7(b),(c),(d));第一个波谷后的最小应力为下屈服极限 σ_{sl} (图1-7(b),(c))。第一个波谷不仅是材料屈服的结果,还受试验系统和记录系统的动惯性守恒影响,被称为“初始瞬时效应”,它与加载速度等因素有关,故不计在内。若只有一次下降波动,则规定波动的最小应力为下屈服极限 σ_{sl} (图1-7(d))。本试验系测定材料的屈服极限 σ_s 或下屈服极限 σ_{sl} 。

压缩时,则不分上、下屈服极限,把按上述方法测定的 σ_s 或 σ_{sl} 当作屈服极限 σ_{sc} 。

$$\sigma_s = \frac{P_s}{A_0}, \sigma_{su} = \frac{P_{su}}{A_0}, \sigma_{sl} = \frac{P_{sl}}{A_0}, \sigma_{sc} = \frac{P_{sc}}{A_0}$$

$P_s, P_{su}, P_{sl}, P_{sc}$ 是对应屈服极限的荷载,可从测力指针移动的特定位置读取。

2. 强度极限 σ_b

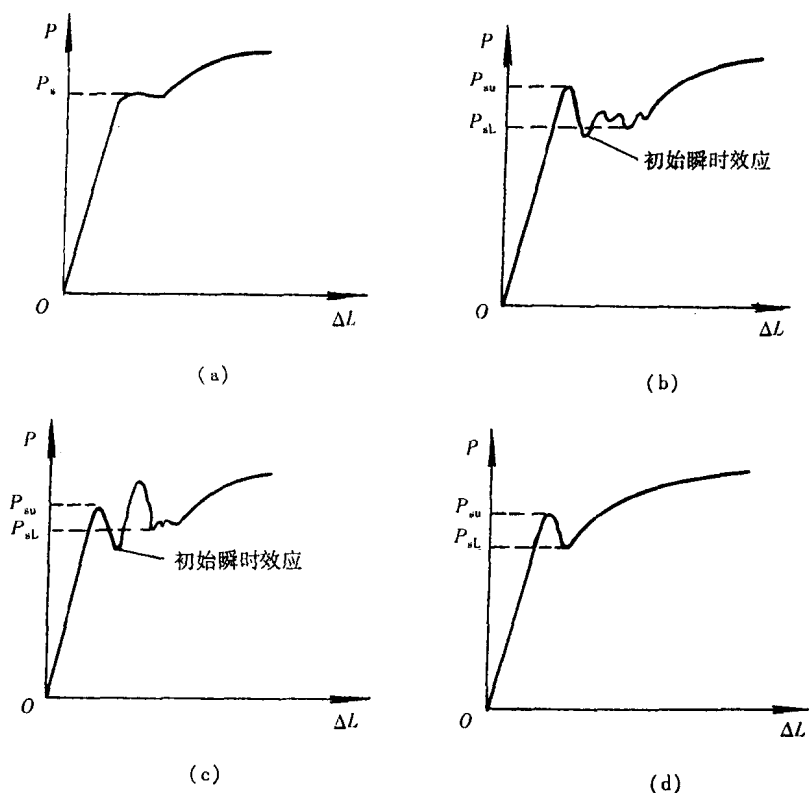


图 1-7 屈服极限的几种类型

试件拉伸过程中最大荷载对应的标称应力称为强度极限 σ_s 。标称应力为用原始截面计算的应力：

$$\sigma_b = \frac{P_b}{A_0}$$

最大荷载 P_b 可从破坏后，随动指针停留位置读取。

3. 压缩强度极限 σ_{bc}

试件受压至破坏前承受的最大标称应力称为压缩强度极限 σ_{bc} ，不发生破裂的材料，如低碳钢则没有压缩强度极限。

4. 延伸率 δ

试件拉断后，标距内的伸长与原始标距 l_0 的百分比称为延伸率(δ)：

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

其中， l_1 是将试件断口原状对接后量取的标距。

许多塑性材料在断裂前发生颈缩(如低碳钢)，会发生不均匀伸长(断口处伸长最大)，于是，断口发生在标距内的不同位置，量取的 l_1 也会不同。为具有可比性，若断口不在标距中部 $\frac{1}{3}l_0$ 长度区段内，需采用断口移中的办法。该方法是：在长段上取离断口近似一半标距格

数的标记点 C, 短段上取标距端 A, 量取 AC 长; 再从 C 点向断口方向量取 BC 长, BC 的格数 = 标距格数 - AC 格数, 则 $l_1 = BC + AC$, 如图 1-8 所示。

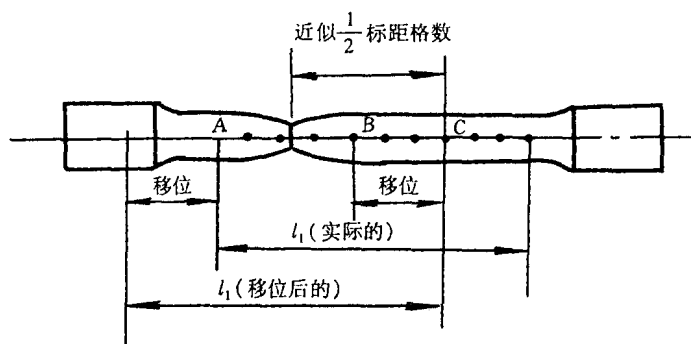


图 1-8 断口移中示意

5. 截面收缩率 ψ

试件断后, 颈缩处横截面积的最大收缩量与原始横截面积 A_0 的百分比称为截面收缩率 ψ :

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

颈缩处最小截面积 A_1 的测定, 是在断口原状对接后, 量取最细处垂直两个方向的直径, 取二者的算术平均值计算。

六、试验步骤

1. 低碳钢拉伸试验

(1) 选择测力量程, 换好对应摆锤, 调节机器零位。

(2) 安装试件。先夹入上夹头, 再调节下夹头位置合适, 然后使随动指针和绘图装置就位, 略加荷载使下夹头夹紧。

(3) 加载测试。开机, 平缓进油, 并观察测力指针和记录笔绘的 $P-\Delta L$ 曲线变化。

在弹性阶段, 要控制应力速率为每秒钟 $3 \sim 30 \text{ N/mm}^2$, 对 $d_0 = 10 \text{ mm}$ 的试件, 即为每秒钟加荷载 $240 \sim 2400 \text{ N}$, 以减小惯性效应对屈服极限测定的影响。在屈服阶段, 按前述测定方法, 读取屈服荷载 P_s 或 P_{sL} 。

屈服结束, 进入强化阶段, 可加快速度, 但两夹头的分离速率每分钟不应超过试件平行长度 L_0 的一半, 即小于 $0.5 L_0 / \text{min}$ 。在强化阶段某点, 卸载后再加载, 观察 $P-\Delta L$ 曲线上的冷作硬化性质。

当测力指针与随动指针分离回摆时, 进入颈缩阶段, 观察试件颈缩现象, 直至断裂。读取随动指针保留的最大荷载 P_b 。关机, 取下试件。触摸断口, 可感觉到由部分变形能转化的热量。

(4) 量取试件断后标距 l_1 和断口最细处直径。

2. 铸铁拉伸试验

加载测试前的各项准备与低碳钢拉伸试验相同——平稳加载, 直至断裂, 读取随动指针