

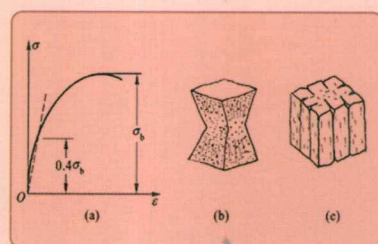
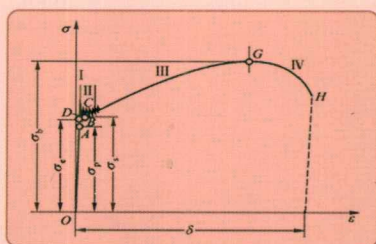
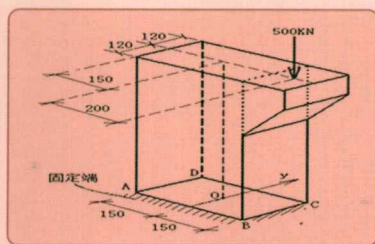


高等教育精品课程“十二五”规划教材·力学类

材料力学实验指导与 实验基本训练

古滨 主编 ■ 万鸣 副主编 ■

CAILIAO LIXUE SHIYAN ZHIDAO YU
SHIYAN JIBEN XUNLIAN



高等教育精品课程“十二五”规划教材·力学类

材料力学实验指导与实验基本训练

主 编 古 滨

副主编 万 鸣

参 编 黄利诚 王 泽 江俊松

前 言

为了适应新世纪课程分级教学的需要和对学生能力培养的要求，我们在总结多年来教学实践的基础上，并结合西华大学力学实验中心的实际情况编写了这本《材料力学实验指导与实验基本训练》。

本书集近年来西华大学材料力学精品课程建设项目、力学实验课程四川省教改项目、四川省省级力学实验示范中心建设项目及成果为一体。本书内容包括绪论、材料力学基本实验、材料力学选做实验、主要实验设备及仪器介绍、基础力学实验基本训练。本书后还附有附录及基础力学实验基本训练的参考答案。

本书的主要特点如下。

(1) 便于帮助实现实验分级教学。实验基本训练分为：基本实验预习思考题、基本实验和选做实验的复习问答题、基本实验概念题、综合实验概念题、基本实验综合题、综合实验综合题。

(2) 可增强教与学的互动性。编写形式介于教材、实验指导书和习题集之间，为师与学生之间搭建了一个互动桥梁。该书还可作为实验预习、实验讨论、实验实训、实验竞赛参考书。

(3) 本书附上了材料力学课程教学要求，便于师生把握力学实验教与学。

本书可作为实验设备及条件与编写学校相当的高等院校工科相关专业的材料力学实验指导用书和基础力学实验实训、竞赛参考书。

本书由古滨主编，万鸣副主编。第1章、第3章、第5章和附录等由西华大学古滨编写，第2、第4章由西华大学万鸣编写，西华大学黄利诚编写了第3章部分内容，西华大学王泽编写了第2章部分内容。全书的大部分图、表由西华大学江俊松完成。全书由古滨统稿、定稿。

在本书的策划和编写过程中，参阅了众多兄弟工科院校力学实验指导书以及江苏省大学生基础力学实验竞赛的参考资料，同时得到了西华大学力学实验中心和力学教学部的老师们的关心和支持，在此一并表示衷心感谢。

限于编者水平，疏漏和遗误在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第1章 绪论	1
1.1 材料力学实验的任务和地位	1
1.2 材料力学实验的发展、现状和趋势	1
第2章 材料力学基本实验	3
2.1 拉伸与压缩试验	3
2.2 扭转试验	9
2.3 纯弯曲正应力实验	14
2.4 金属材料弹性常数 E 、 μ 的测定	17
2.5 粘贴电阻应变片实验	19
2.6 电阻应变片的接桥方法实验	23
2.7 弯扭组合变形时主应力的测定	27
2.8 压杆稳定试验	29
第3章 材料力学选做实验	32
3.1 低碳钢剪切弹性模量 G 的测定	32
3.2 材料的冲击实验	33
3.3 金属疲劳演示实验	35
3.4 光弹性观察实验	39
第4章 主要实验设备及仪器介绍	42
4.1 微机控制电子万能试验机	42
4.2 微机控制扭转试验机	54
4.3 动静态综合测试仪	55
4.4 力 & 应变综合参数测试仪	61
4.5 电子式动静态力学组合试验台	65
4.6 材料力学实验台	67
第5章 基础力学实验基本训练	69
5.1 基本实验预习思考题	69
5.2 基本实验和选做实验的复习问答题	70
5.3 基本实验概念题	71
5.4 综合实验概念题	73
5.5 基本实验综合题	75
5.6 综合实验综合题	80

附录 I 误差理论及实验数据处理	88
附录 II 最小二乘法	91
附录 III 几种常用材料的主要力学性能 (等)	92
附录 IV 材料力学课程教学基本要求 (A 类)	94
基础力学实验基本训练答案	98
参考文献	102

第 1 章 绪 论

1.1 材料力学实验的任务和地位

1. 材料力学实验的任务

面向生产，为生产服务。根据正规生产过程，科学设计的程序应该是：首先了解工况、外载荷、设计范围等；其次是选料、设计尺寸、强度核算和应力分析；然后试生产、现场实测、事故分析，经过长期观察，最后才能投产。材料力学试验在其中发挥了主要作用。

面对新技术新方法的引入，研究新的测试手段。近几十年来由于光学测试技术的发展，光电子学，光纤的发展，产生了很多新的光测法，概括可称为“光力学”。还有疲劳、断裂、细微尺度力学实验等。

面向材料力学，为材料力学理论的发展服务。材料力学的一些理论是以某些假设为基础的，例如杆件的弯曲理论就以平面假设为基础。用实验验证这些理论的正确性和适用范围，有助于加深对理论的认识和理解。至于对新建立的理论和公式，用实验来验证更是必不可少的。实验是验证、修正和发展材料力学理论的必要手段。

2. 材料力学实验的地位

材料力学实验是材料力学自身发展过程中对新提出的理论及计算方法进行检验的重要方法，因为用新的理论及计算方法所得的结果必须经过实验来加以验证。

材料力学实验能解决许多理论工作无法解决的工程实际问题。某些情况下，例如因构件几何形状不规则或受力复杂等，应力计算并无适用理论。这时，用诸如电测、光弹性等实验应力分析方法直接测定构件的应力，便成为有效的方法。对于经过较大规模简化处理后所得到的理论或数值模型，其计算结果的可靠性更需要实验分析来加以验证。

材料力学实验是材料力学发展的三大支柱（新的理论，计算方法，力学实验）之一。

1.2 材料力学实验的发展、现状和趋势

1. 材料力学实验的发展

从发展史来看，力学实验方法的发展与力学理论体系发展不同。理论往往是有一个体系，并不断发展和完善的。而力学实验就不同了，它的方法都借助于物理基础、新概念和新技术，经过再创造使之成为力学服务，它不断更新，形成许多种相对独立的方法，如光弹性、电阻应变测量、云纹、声发射等。因此，力学实验特点是多体系、相对独立性、困难性、交叉性、渗透性和无界性。力学实验历史是很悠久的，可以说与理论平行。实验（在实验室）与实践（在现场）是一样的，如果没有现场实验作为基础，古代人怎么可能在没有理论体系的情况下，造出那么多出色的建筑，如塔、宫殿、赵州石桥等，至今犹存。

材料力学实验的发展,在西方首先是达·芬奇(Da Vinci),他做了梁的弯曲试验。之后就是伽利略(Galileo),他做过悬臂梁试验和拉伸强度试验。再以后就是胡克(Hooke),他在1678年发表弹簧论文,从而产生了胡克定律,给弹性力学奠定了理论基础。后来马里沃特(Mariotte)的简支梁试验,伯努里(Bernoulli)的悬臂梁试验,欧拉(Euler)的稳定试验,库仑(Coulomb)的剪切试验,以及泊松(Poisson)、圣维南(St. Venant)、柯西(Cauchy)、纳维(Navier)等人也作出了重要贡献。

我国有记载的是墨子经下篇记有:“发均悬轻而发绝,不均也,均其绝也莫绝”,以及“衡木加重焉而不挠极胜重也。若校交绳无加焉而挠极不胜重也”。墨子这个拉伸与弯曲试验比伽利略还早2 000年。

2. 材料力学实验的现状

我国材料力学方面的论文多偏重于经典理论和方法,缺乏有根据的计算和实验验证,虽然理论做得很细很巧,但不能说是一个完美的科学成果。突破实验和计算这两个薄弱环节应该是我国材料力学工作者的急迫任务。材料力学方面的科研成果如果缺乏实验验证就是个不完整的成果,而要做大量的、系统的实验作为其重要支撑。

3. 材料力学实验的发展趋势

广泛地应用电阻应变测量技术,使得从真空到高压,从深冷到高温,从静态到高频条件下的应变,都可获得有效的测量数据。又如把经典方法和新兴科学技术结合起来(全息干涉法,全息光弹性法,散斑干涉法,声发射技术等),不断增加测试手段,扩大了测量和应用范围、提高了测试精度。开展宏观和微观相结合的实验研究,深入探索失效机理和各种影响材料强度因素的规律性。实验技术正向广度和深度发展。

实验装备的自动化。在实验数据的采集、处理、分析和控制方面实现计算机化。如大型动载实验,已能做到实时的数据处理,大大缩短试验周期,及时提供准确的试验分析数据和图表。出现多种光弹性自动测试装置的方案。

随着计算机及有限元分析和其他数值分析方法的应用,材料力学实验正朝着实验与计算相结合,物理模型与数学模型相结合的方向发展。

第 2 章 材料力学基本实验

2.1 拉伸与压缩试验

2.1.1 拉伸试验

常温、静载下的轴向拉伸试验是材料力学试验中最基本、应用最广泛的试验。通过拉伸试验，可以全面地测定材料的力学性能，如弹性、塑性、强度、断裂等力学性能指标。这些性能指标对材料力学的分析计算、工程设计、选择材料和新材料开发都有极其重要的作用。

1. 实验目的

(1) 测定低碳钢的屈服极限 σ_s (屈服强度 R_{e1})、强度极限 σ_b (抗拉强度 R_m)、断后伸长率 δ ($A_{11.3}$)、断面收缩率 ψ (Z)。

(2) 测定铸铁的强度极限 σ_b (抗拉强度 R_m)。

(3) 观察上述两种材料在拉伸过程中的各种现象 (屈服、强化、颈缩等)，并绘制拉伸图 ($P - \Delta L$ 曲线图)。

(4) 比较低碳钢 (塑性材料) 与铸铁 (脆性材料) 力学性能的特点。

(5) 了解微机控制电子万能试验机的构造、工作原理，并掌握其操作使用方法。

2. 主要设备、仪器及材料

(1) 微机控制电子万能试验机。

(2) 千分尺、游标卡尺、分规、钢片尺。

(3) 低碳钢及铸铁拉伸试件。

3. 实验原理

表示材料力学性能的四大指标：屈服极限 σ_s 、强度极限 σ_b 、断后伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 是通过拉伸试验来测定的。为此，应首先用待测材料制备试件。拉伸试件可制成圆形或矩形截面。圆形截面试件如图 2-1 所示。

试件头部 (夹持部分) 用以装入试验机夹具中以便夹紧试件之用，其形状可根据夹具形状而定。其可制成圆柱形 (图 2-1)、阶梯形 (图 2-2)、或螺纹形 (图 2-3)。过渡部分用以保证标距部分受力均匀。试件中段用于测量拉伸变形，也是试件的主体，此段长度 l_0 称为“标距” (亦叫计算长度)。两头部间的等直段长度 l 叫做平行长度，它应大于标距 l_0 。

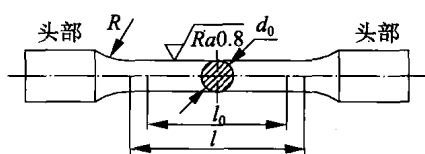


图 2-1 圆形截面试件

试件的尺寸和形状对试验结果有一定影响。为能正确比较材料的力学性能，国家标准

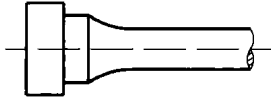


图 2-2 阶梯形头部

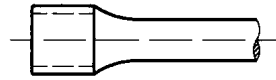


图 2-3 螺纹形头部

(GB 6397—1986) 对试件的尺寸和形状都作了统一规定。按 GB 6397—1986 的规定，拉力试件分为比例试件和非比例试件两种。比例试件的标距长度与横截面积之间具有如下关系：

$$l_0 = k \cdot \sqrt{A_0}$$

系数 k 通常为 5.65 和 11.3。前者称为短试件，后者称为长试件。短、长圆形截面试件的标距长度 l_0 就分别等于 $5d_0$ 和 $10d_0$ 。非比例试件的标距长度和横截面积之间无上述一定的关系。

微机控制电子万能试验机可自动绘出低碳钢拉伸图 ($P - \Delta L$ 曲线图)，如图 2-4 (a) 所示。由图可见，低碳钢的整个拉伸过程可分为如下四个阶段。

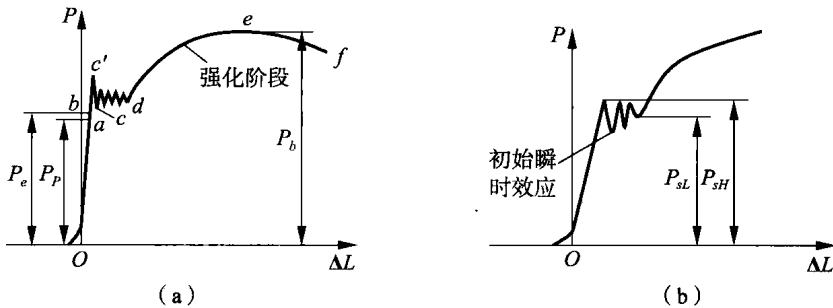


图 2-4 低碳钢拉伸图

1) 弹性阶段 ($O a b$ 段)

当载荷不超过 P_e 时，试件只有极小的弹性变形，故曲线呈陡峭上升状。其中，在 Oa 段 (载荷不超过 P_p)，试件的应力 σ 与应变 ε 成正比，故 Oa 为一直线段。对应于 a 点的应力 σ_p 称为比例极限，而对应于 b 点的应力 σ_e 称为弹性极限 (本次实验均不测)。至于曲线起始部分略呈弯曲，系由于试件头部在夹头中的塑性变形或打滑所致。

2) 屈服阶段 ($b c d$ 段)

当载荷超过 P_e 之后，试件的变形既有弹性变形，同时又有塑性变形。此时，试件进入屈服阶段。所谓“屈服”，即材料暂时失去抵抗变形的能力的现象。它是因金属晶格间产生相对滑动所致。此时，载荷增加不上去，或略有波动，但变形却不断发生。拉伸图中得到一锯齿形曲线 bcd ，如图 2-4 (b) 所示。其中，与最高点 c' 载荷 P_{sh} 对应的应力称为上屈服强度，它受变形速度和试样形状的影响一般不作为强度指标。同样，载荷首次下降的最低点 c (初始瞬时效应) 也不作为强度指标。一般将初始瞬时效应以后的最低载荷 P_{sl} 除以试样的初始横截面积 A_0 ，即下屈服强度，作为屈服极限 (屈服强度) σ_s ，即

$$\sigma_s = \frac{P_{sl}}{A_0} \tag{2.1}$$

至于某些材料，屈服时的 $P - \Delta L$ 曲线不是呈锯齿状，而是呈平台状（如图 2-5 所示）。这一平台叫做屈服平台。

3) 强化阶段 (de 段)

屈服结束后，材料又恢复了抵抗变形的能力。要使试样继续伸长，必须增大载荷。此种现象，叫做强化。在拉伸图 $P - \Delta L$ 曲线中，曲线又开始上升。

材料进入强化阶段后，若在此阶段的某一点卸载，则可在拉伸图上得一卸载曲线，它与曲线的起始部分的弹性直线段基本平行，这就是所谓的“卸载定律”。若卸载后又重新加载，则重新加载的曲线将沿卸载曲线上升到原卸载点，此后的曲线基本上与未卸载的曲线相重合。这就是所谓的“冷作硬化效应”。在强化阶段，试件横向尺寸明显缩小。

随着实验继续进行，拉伸曲线上升平缓，说明此时变形较快而载荷增加较慢。强化阶段最高点 e 所对应的载荷，即为试件承受的最大载荷 P_b ，其所对应的应力即为强度极限（抗拉强度） σ_b ，于是

$$\sigma_b = \frac{P_b}{A_0} \quad (2.2)$$

4) 局部变形阶段 (ef 段)

载荷达到最大值 P_b 之后，曲线开始下降。与此同时，在试件的某一局部范围内，横向尺寸急剧缩小，这就是所谓“颈缩”现象（图 2-6）。由于颈缩部分横向尺寸迅速缩小，试件变形所需拉力亦相应减小。故拉伸图上曲线向下弯曲。直至最后到 f 点，试件在颈缩处被拉断。

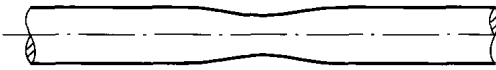


图 2-6 试件颈缩

材料的塑性指标是用断后伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 表示。

所谓断后伸长率，即断后标距的残余伸长 $l_1 - l_0$ 与原始标距 l_0 之比的百分率，即

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (2.3)$$

式中 l_0, l_1 ——分别表示试件标距原长和拉断后的标距长度。

所谓断面收缩率是指断裂后试样横截面积的最大缩减量 $A_0 - A_1$ 与原始横截面积 A_0 之比的百分率。即

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (2.4)$$

式中 A_0 ——原始横截面积；

A_1 ——试件断裂后，颈缩处最小横截面积。

铸铁拉伸图如图 2-7 所示。它不像低碳钢拉伸时可明显地分为线性、屈服、颈缩等阶段，而且是一条接近直线的曲线，且无下降趋势。一旦达到最大载荷 P_b ，试件就会突然断裂，且断裂后残余变形甚小。鉴于上述特点，可见不具备 σ_s ，且测其 δ 和 ψ 也无实际意义。故只需测其最大载荷 P_b ，则其强度极限（抗拉强度） σ_b 为

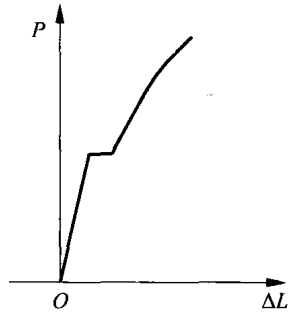


图 2-5 屈服平台

$$\sigma_b = \frac{P_b}{A_0} \quad (2.5)$$

4. 实验方法及操作步骤

1) 低碳钢拉伸试验

(1) 试件的准备。本实验使用 $d_0 = 10 \text{ mm}$, $l_0 = 100 \text{ mm}$ 的长比例试件, 其材料牌号为 Q235 (或 A3 钢)。在试件等直段内, 取标距 l_0 分为 10 格。用千分尺测量标距两端及中间三个横截面的直径, 每一横截面上应分别在两个相互垂直的方向上各测一次, 而后取其平均值。最后, 取三个平均值中最小者作为试件原始直径 d_0 , 并以此计算试件原始横截面积 A_0 。

(2) 进行试验: 具体操作步骤参阅“4.1 微机控制电子万能试验机”的操作方法。

试件拉断后, 将计算机上自动显示出的下屈服载荷 P_{sL} 、最大载荷 P_b 值记录下来。

从夹头中将拉断后的试件取下, 然后将断裂试件的两端按断口方位对齐并靠紧, 用分规及钢片尺测两标距刻线间的长度即得 l_1 ; 同时, 用游标卡尺在断口处相互垂直的两个方向上测其直径 d_1 , 以二者的算术平均值计算断口最小横截面积 A_1 。

2) 铸铁拉伸试验

试件的准备、进行试验等步骤同低碳钢拉伸试验。由于铸铁系脆性材料, 在整个拉伸过程中变形很小, 无屈服、颈缩现象, 无须测 σ_s 、 δ 、 ψ , 拉伸曲线无直线段, 可以近似认为经弹性阶段直接断裂, 其断口是平齐粗糙的。故试验时开动试验机, 缓慢加载至试件断裂为止。然后停车, 记录下最大载荷 P_b 。试验机的自动绘图器绘出铸铁的拉伸曲线, 如图 2-7 所示。

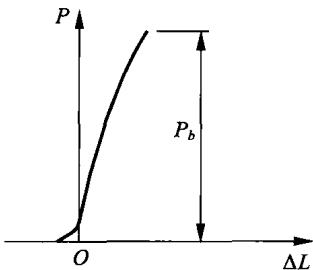


图 2-7 铸铁拉伸图

5. 试验结果处理

(1) 根据所测得的低碳钢试件的屈服载荷 P_{sL} , 以及低碳钢与铸铁试件的最大载荷 P_b , 分别计算其屈服极限 (屈服强度) σ_s 、强度极限 (抗拉强度) σ_b 。

(2) 根据低碳钢试件试验前、后的标距长度 l_0 和 l_1 及横截面积 A_0 和 A_1 , 分别计算其断后伸长率 δ 及断面收缩率 ψ 。

(3) 断口移中处理确定断后延伸率:

①原则上只有断裂处与最接近的标距标记的距离不小于原始标距的三分之一情况方为有效。但断后伸长率大于或等于规定值, 不管断裂位置处于何处测量均为有效。

②若试件断口至相邻最近的一标距标记的距离小于或等于 $l_0/3$ 时, 拉断后的标距长度 l_1 需采用断口移中法确定: 在试件长段上自断口“O”处截取基本等于短段的格数, 得到 B 点, 之后, 若长段所余格数为偶数时如图 2-8 (a) 所示, 则取所余格数的一半得 C 点, 于是

$$l_1 = AO + OB + 2BC$$

若长段所余格数为奇数时如图 2-8 (b) 所示, 则分别取所余格数减 1 之半和加 1 之半而得 C 及 C_1 点, 于是

$$l_1 = AO + OB + BC + BC_1$$

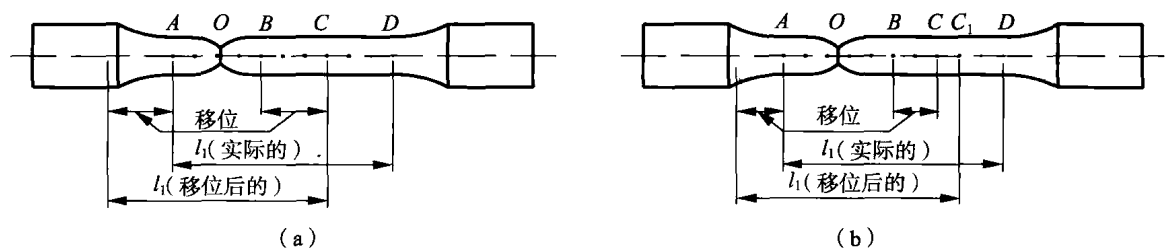


图 2-8 断口移中处理确定断后延伸率

(a) 余格为偶数; (b) 余格为奇数

采取断口移中处理的原因,系因当试件断口靠近试件端部时,在断裂试件较短的一段上,将受到试件头部较粗部分的影响而降低了颈缩部分局部的伸长量,从而使断后伸长率 δ 偏小。采用上述方法处理,则可适当弥补其偏差。

6. 破坏性实验注意事项

- (1) 参阅“4.1 微机控制电子万能试验机”的操作方法与注意事项。
- (2) 试件安装必须正确,不得偏斜,头部夹入部分不得过短。
- (3) 机器运行中,如发现异常应立即停车,待排除故障后再行开车试验。
- (4) 整个实验结束后,请指导教师检查认可原始记录。认真清理实验现场,将所用设备、仪器等恢复原始状态。

2.1.2 压缩试验

1. 实验目的

- (1) 测定压缩时低碳钢的屈服极限 σ_s 和铸铁的强度极限 σ_b 。
- (2) 观察低碳钢和铸铁压缩时的变形及破坏现象,绘制压缩图($P-\Delta L$ 图),并与拉伸时进行对比。

2. 主要设备、仪器仪表及材料

- (1) 微机控制电子万能试验机。
- (2) 千分尺、游标卡尺。
- (3) 低碳钢及铸铁压缩试件。

3. 实验原理及装置

低碳钢及铸铁等金属材料的压缩试件一般制成圆柱形,如图2-9(a)所示。目前常用的压缩试验方法是两端平压法。因此,试件的上、下两个端面与试验机压头之间会产生很大的摩擦力,如图2-9(b)所示,这将阻碍试件上、下部的变形,导致所测得的抗压强度较实际偏高。当试件的高度相对增加,摩擦力对试件中部的影响变小。可见其抗压强度与比值 h_0/d_0 有关。所以,压缩试验与试验条件有一定关系。为在相同试验条件下对不同材料的压缩性能进行比较,一般规定: $1 \leq h_0/d_0 \leq 3$ 。若 $h_0/d_0 < 1$,则摩擦力影响大,若 $h_0/d_0 > 3$,虽摩擦力的影响减小,但试件易弯曲的影响却突出起来。为保证试件承受轴向压力,试件的两个端面应平行,且与试件轴线垂直;为减少摩擦力的影响,两端面应具有较高的光洁度,同时,试验时还应在两个端面上涂以少许黄油之类的润滑剂。试验时,试件应安放在球形承垫上,如图2-9(c)所示。这样,当试件的两端面稍有不平时,球形承垫可起到调节作用,使压力通过试件轴线。

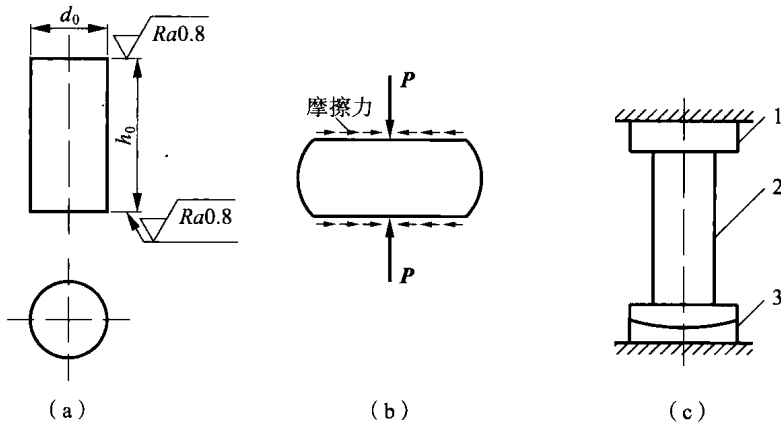


图 2-9 压缩试件

(a) 压缩试件; (b) 试件端面的摩擦力; (c) 压缩时的球形承垫
1—承垫; 2—试件; 3—球形承垫

1) 低碳钢压缩

低碳钢压缩时, 同样存在比例极限, 弹性极限、屈服极限, 且数值和拉伸时所得的相应数值差别不大, 但屈服则不如拉伸时明显。

从低碳钢压缩图 (图 2-10) 中可看出, 当载荷超过比例极限所对应的载荷 P_p 以后, 便开始出现变形增加较快的一非线性小段, 此即表示到达了屈服载荷 P_s 。进入屈服后, 由于试件塑性变形迅速增长, 试件横截面积随之增大, 所能承受的载荷也随之增大。因此, 低碳钢压缩时屈服很不明显, 故测 P_s 时尤应注意观察。最后在计算机上读出自动显示的屈服载荷 P_s 的值。超过屈服之后, 试件由原来的圆柱逐渐被压成鼓形, 如图 2-11 所示, 但终不致破坏。故无法测出其最大载荷 P_b 及强度极限 σ_b 。

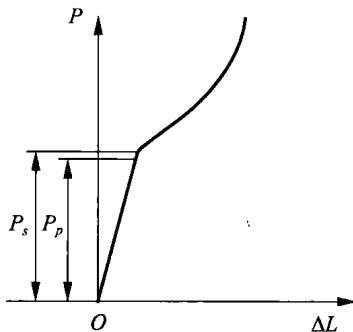


图 2-10 低碳钢压缩图

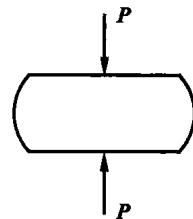


图 2-11 压缩时低碳钢变形示意图

2) 铸铁压缩

铸铁压缩图如图 2-12 所示。试件受压达到最大载荷 P_b 前将出现较大塑性变形, 而后略呈鼓形沿与轴线成大约 45° 方向破裂, 如图 2-13 所示。此时试验机停止转动 (并伴有较大的响声), 在计算机上可读出自动显示的最大载荷 P_b 的值。

铸铁压缩时沿 45° 左右斜截面断裂, 其主要原因系由剪应力所致。如果测量其断口的倾角 α , 可发现 α 略大于 45° , 而不正是最大剪应力所在的截面。这是由于试件两端存在摩擦力所致。

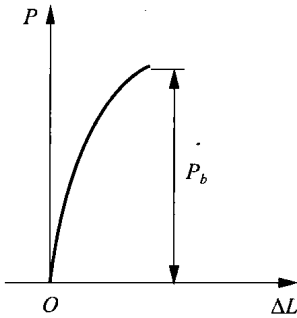


图 2-12 铸铁压缩图

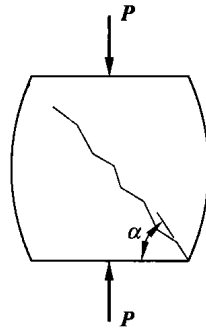


图 2-13 压缩时铸铁破坏断面

4. 实验方法及操作步骤

1) 低碳钢试件压缩

(1) 试件的准备：用千分尺测量试件的两端及中部三个横截面处的直径。每一横截面应分别在相互垂直的两个方向上各测一次，取其平均值。取三个平均值中最小者作为试件原始直径 d_0 ，并以此计算原始横截面积 A_0 。

(2) 安装试件：在试件的两个端面上涂以少许黄油，然后将其准确地安放在试验机球形承垫中央。

(3) 进行试验：具体操作步骤参阅“4.1 微机控制电子式万能试验机”的操作方法。

试件压成鼓形后即可卸载停车。将计算机上自动显示出来的屈服载荷 P_s 值记录下来，然后取下试件即可。

2) 铸铁试件压缩

铸铁试件压缩试验的方法步骤与低碳钢压缩试验基本相同。但无屈服极限而只测强度极限 σ_b 。试件缓慢均匀加载，破裂后试验机自动停车。然后将计算机上自动显示出来的最大载荷 P_b 值记录下来。

5. 试验结果处理

根据测试记录，计算出低碳钢的屈服极限 $\sigma_s = P_s/A_0$ 和铸铁的强度极限 $\sigma_b = P_b/A_0$ 。

6. 破坏性实验注意事项

- (1) 参阅“4.1 微机控制电子万能试验机”的操作方法与注意事项。
- (2) 加载必须缓慢平稳，严格避免试件与上压头相撞击。
- (3) 铸铁压缩时，应加防护罩，以免碎片伤人。

7. 预习思考题和复习问答题

完成 5.1 中与本实验相关的预习思考题和 5.2 中与本实验相关的复习问答题。

2.2 扭转试验

1. 实验目的

- (1) 在比例极限内验证剪切胡克定律，测定切变模量 G 。
- (2) 测定低碳钢的剪切屈服极限 τ_s 和剪切强度极限 τ_b ，并绘制扭转图 ($T-\varphi$ 图)。

- (3) 测定铸铁的剪切强度极限 τ_b ，并绘制扭转图 ($T-\varphi$ 图)。
- (4) 观察比较低碳钢和铸铁试件扭转破坏的特点。

2. 主要设备、仪器及材料

- (1) 扭转实验装置。
- (2) 低碳钢及铸铁扭转试件。
- (3) 千分尺、钢片尺。
- (4) 镜式转角仪。
- (5) 微机控制扭转试验机。

3. 实验原理及装置

1) 验证胡克定律 (在扭转实验装置上进行)

圆轴承受扭转时，材料完全处于纯剪应力状态。当扭矩不超过 T_p 时，材料处于弹性状态，其变形与载荷的关系服从胡克定律：

$$\varphi = \frac{Tl_0}{GI_p} \tag{2.6}$$

式中 T ——扭矩；
 l_0 ——标距长度；
 φ ——标距 l_0 内的扭转角；
 G ——切变模量；

I_p ——极惯性矩，对于圆截面： $I_p = \pi d_0^4 / 32$ 。

本次实验只验证扭转角 φ 与扭矩 T 的正比例关系，采用“等值增量法”用砝码逐级加载。实验装置如图 2-14 所示。

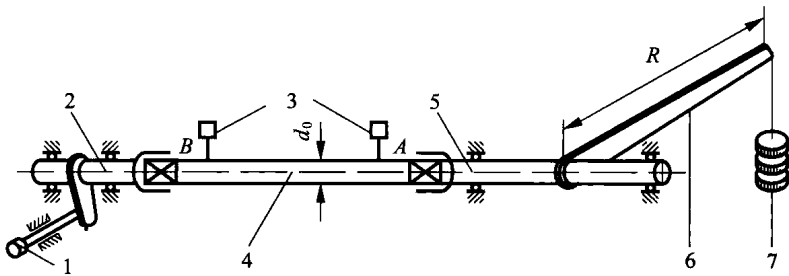


图 2-14 扭转实验装置

1—调整螺钉；2—左套轴；3—反射镜；4—试件；5—右套轴；6—杠杆；7—砝码

所谓等值增量法，即每次增加一个相等的载荷增量 ΔP ，同时测量出相应的变形增量 $\Delta\varphi$ 如果也是每次都相等（或基本相等），从而也就验证了变形与载荷的正比例关系。

采用增量法进行实验，不仅可克服由于机器、仪表初始位置的机构间隙以及蠕动打滑等所引起的误差，而且可以根据增量变化的情况来判断实验是否有误。如果增量的变化显著偏离一定规律，则表明实验有误，则应停止实验进行检查。本次实验是在弹性范围内进行，故一旦发现误，可卸掉载荷，检查排除故障后，重新加载进行实验。

将一圆截面试件的两端头部削扁，装入左、右套轴的扁孔中。当砝码加在杠杆末端时，其所产生的力矩 $T = P \cdot R$ 便通过套轴传递给试件，使试件产生扭转变形。在试件上分别取 A、B

两个截面，使 A 、 B 截面间的距离等于 l_0 （即标距）。然后，分别在 A 、 B 两截面上各装一面反射镜，利用镜式转角仪便可测出 A 、 B 截面的转角 φ_A 、 φ_B 。则标距 l_0 范围内的相对扭转角 $\varphi = \varphi_A - \varphi_B$ 。若每次增加相等的载荷增量 ΔP （即相等的扭矩增量 ΔT ），所测得相应的相对扭角增量 $\Delta\varphi$ 也是每次相等（或基本相等），从而也就验证了扭转胡克定律的正确性。因标距 l_0 和极惯性矩可事先测量、计算而得，故在验证胡克定律的基础上，即可求得切变模量 G ，即

$$G = \frac{\Delta T \cdot l_0}{\Delta\varphi \cdot I_p} \quad (2.7)$$

式中 ΔT ——扭矩增量；
 $\Delta\varphi$ ——相对扭转角增量；
 I_p ——圆截面的极惯性矩。

镜式转角仪简介：镜式转角仪是利用小镜片随试件变形而感受偏转，按光杠杆原理放大来测量试件在弹性范围内的微小角变形的仪器，它是由变形感受机构和读数机构两部分所组成。变形感受机构是用夹具固定于试件上的一平面反射镜，如图 2-15 所示。支架 3 可绕夹具体上的销柱 4 水平转动，而转动调节螺钉 1 可调节反射镜 2 的仰角。读数机构则是由望远镜和刻度尺组成，安装在三脚架上。

镜式转角仪工作原理：工作原理如图 2-16 所示。用压紧螺钉 6 将环形开口夹具 5 及反射镜 2 一并固定在试件欲测转角的截面上，在距离反射镜 L 远处安装读数机构（望远镜和刻度尺）。实验前，细心调整望远镜及反射镜，并使望远镜筒的轴线与反射镜片平面垂直，便可由望远镜中“+”字线上读出由镜片反射来的标尺刻度值 A_1 。当被测截面转动 φ 角后，镜片亦随之转动相同的角度 φ （如图 2-16 中点画线所示），此时望远镜中读数变为 A_2 。

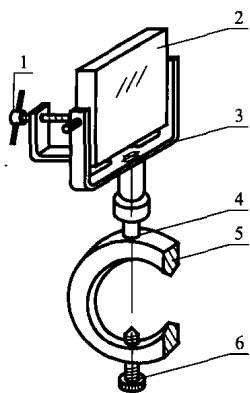


图 2-15 变形感受机构

1—调节螺钉；2—反射镜；3—支架；
 4—销柱；5—夹具；6—压紧螺钉

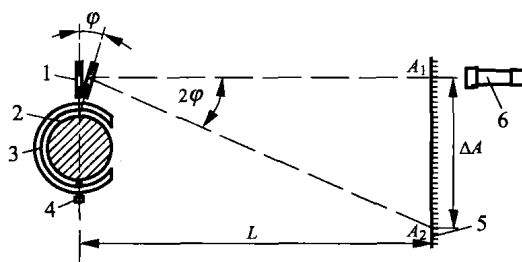


图 2-16 镜式转角仪工作原理

1—反射镜；2—试件；3—夹具体；
 4—压紧螺钉；5—刻度尺；6—望远镜

由几何关系可得

$$\tan 2\varphi = \frac{A_2 - A_1}{L} = \frac{\Delta A}{L}$$

当 φ 很小时， $\tan 2\varphi \approx 2\varphi$ ，故

$$\varphi = \frac{\Delta A}{2L} \quad (\text{rad}) \quad (2.8)$$

镜式转角仪操作使用方法如下。

(1) 安装变形感受机构：将反射镜 2 和支架 3 装在夹具体 5 上，并使夹具体刃口对准欲测转角的截面。

(2) 装读数机构：将望远镜和刻度尺安装在三脚架上，并使刻度尺与反射镜的距离为 L ，望远镜筒与反射镜面相垂直。

(3) 调整读数机构：先对距望远镜约为 $2L$ 的目标进行观察，调整好望远镜的焦距。然后将望远镜对准反射镜，同时配合调整望远镜（可做上、下、左、右转动或前、后移动）和反射镜（可在水平或垂直方向转动），使之能从望远镜中清晰地看见反射来的标尺刻度。最后再微微调整望远镜（或反射镜）的仰角，以使镜筒中的“+”字线对准标尺上某一初始刻度线（例如“0”刻度线）。完成上述调整后即可进行测量。

(4) 注意事项：不得用手触摸望远镜头及反射镜面。若镜头或镜面上有灰尘或污物时，应用软毛刷或擦镜纸除去。

2) 测定低碳钢的 τ_s 、 τ_b 和铸铁的 τ_b 并绘制扭转图（在微机控制扭转试验机上进行）

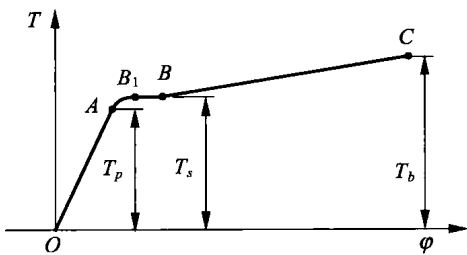


图 2-17 低碳钢试件扭转图

(1) 低碳钢扭转图如图 2-17 所示。图中起始直线段 OA 表明试件在此阶段中的 T 与 φ 成正比关系，截面上的切应力呈线性分布，如图 2-18 (a) 所示。在 A 点处， T 与 φ 的比例关系开始破坏，此刻截面周边上的切应力达到了材料的剪切屈服极限 τ_s ，相应的扭矩记为 T_p 。这时，由于截面内部的切应力尚小于 τ_s ，故试件仍具有承载能力， $T-\varphi$ 曲线呈继续上升的趋势。

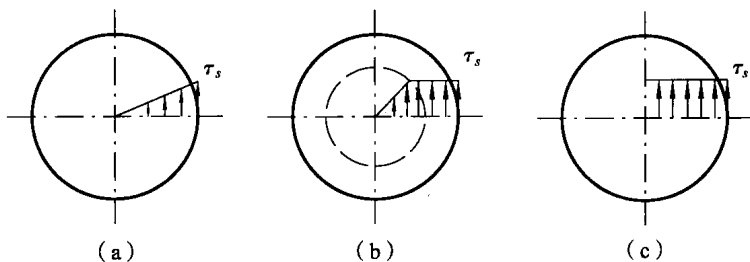


图 2-18 截面上切应力分布图

(a) $T \leq T_p$ 时；(b) $T_p < T < T_s$ 时；(c) $T = T_s$ 时

扭矩超过 T_p 后，截面上的切应力分布发生变化，如图 2-18 (b) 所示。在截面上出现了一个环形塑性区。随着 T 的增加，塑性区逐渐向中心扩展， $T-\varphi$ 曲线微微上升，直至 B 点趋于平坦，这时的塑性区几乎占了全部截面。如图 2-18 (c) 所示。 T_s 可由试验机显示屏上自动显示出来。所以剪切屈服极限 τ_s 近似为

$$\tau_s = \frac{3}{4} \cdot \frac{T_s}{W_t} \tag{2.9}$$

式中 $W_t = \frac{\pi}{16} d^3$ ——圆形截面试件的抗扭截面系数。

继续给试件加载，试件将继续变形，材料进一步强化。当达到 $T-\varphi$ 曲线最高点 C 时，试件被剪断。此时，最大扭矩 T_b 仍由试验机显示屏上自动显示出来。与式 (2.9) 相应，剪