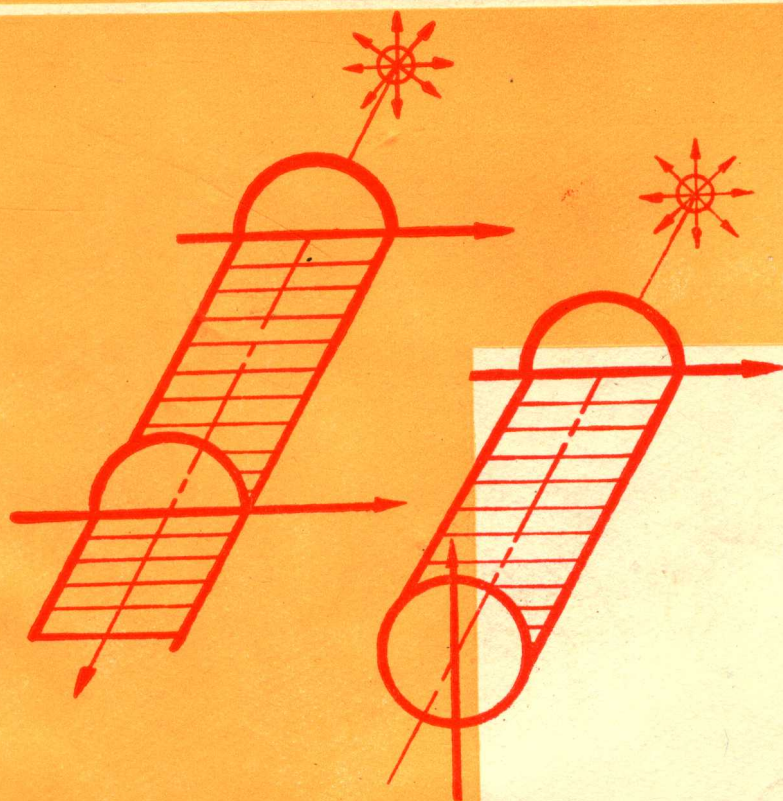


# 材料力学实验

(少学时)

万德连 编



中国矿业大学出版社



高等学校教学用书

内容简介

# 材料力学实验

(少学时)

万德连 编



中国矿业大学  
(少学时) 金属材料力学  
实验

中国矿业大学图书馆  
地址：徐州市淮海路  
电话：0516-2861111  
邮编：221008

中国矿业大学出版社

07.1 力学

13.0

(苏)新登字第010号

## 内 容 简 介

本书是根据原教育部制订的《材料力学教学大纲》及《材料力学教学基本要求》的精神编写的,适用于少学时(50~60学时)各专业的材料力学实验教学。

本书共分两部分:第一部分为材料力学实验指导,着重介绍了一些常用的材料试验机和变形测量仪表;第二部分为基本实验,阐述了九个常规试验的方法和步骤。

本书也可作为函授、电视、职工大学材料力学实验的教学用书。

责任编辑 安乃隽

技术设计 关湘雯

高等学校教学用书  
材料力学实验(少学时)

万德连 编

---

中国矿业大学出版社出版

新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷

开本787×1092毫米1/16 印张 3.5 字数 79 千字

1992年5月第一版 1992年5月第一次印刷

印数:1—5000 册

---

ISBN 7-81021-691-0

---

0·34

定价:1.70元

# 前 言

本教材是根据原教育部材料力学课程指导小组制订的《材料力学教学大纲》及《材料力学教学基本要求》的精神编写的，适用于少学时（50~60学时）各专业的材料力学实验教学。

在本书出版前，曾在中国矿业大学校内以讲义形式在本科生的实验教学中使用13届。随着试验设备及仪表的更新和补充，讲义作过多次修改和增删，经过十多年的教学实践，讲义逐渐完善而成为此教材。

本书共分两部分：第一部分为材料力学实验指导，着重介绍了一些常用的材料试验机 and 变形测量仪表；第二部分为基本实验，阐述了九个常规试验的方法和步骤。

本书也可作为函授、电视、职工大学材料力学实验的教学用书。

由于作者水平有限，书中难免有不正确或疏漏之处，恳望读者批评指正。

作 者

1992年元月



# 第一篇 实验指导

## 绪 论

“科学实验是科学理论的源泉，是自然科学的根本，是工程技术的根本”。

材料力学实验是课程教学的一个重要环节，也是发展材料力学的必由之路。材料力学的理论必须建立在实验基础上，虎克定律就是通过一系列试验后建立的。工程设计中需用的各种材料的力学常数，需由实验来测定。研究机器零件或结构的强度和刚度问题，确定结构的工作载荷和设备的工况，往往采用测试方法来解决。可见，掌握材料力学实验的技能和方法是十分必要的。

材料力学实验可以分为三类：

(1) 研究和测定工程材料的力学性质，如测定材料的弹性常数、强度指标等。通过试验，认识材料在不同载荷作用下的性能及影响因素，了解材料受载后变形的特点，以便工程设计时选用合适的材料；

(2) 验证材料力学的理论，了解材料受载时的力学现象，加深对理论的认识。或者，通过实验，建立新的理论；

(3) 应力或应变分析实验。有许多实际构件，其形状和受载都比较复杂，仅仅依靠理论来分析应力和应变较难得到可靠的结果，还需要配合应力或应变分析实验，以检验理论的精确性。应力或应变分析常用的方法有电测法、光弹性法、云纹法、全息干涉法等。

# 第一章 材料试验机

## §1-1 概 述

进行材料力学性能试验的机器，称为材料试验机。按功用，材料试验机分为单功能和多功能两大类。前者只做单项试验，并以其功用命名，如扭转试验机、疲劳试验机等；多功能试验机可做多项目试验，称为万能试验机，它能做拉伸、压缩、剪切和弯曲等试验。

通常在试验机名称前面冠以数字，表示机器给出的最大载荷。为表明加载方式，在名称上还冠以“机械式”、“液压式”，如 100 kN 液压式万能材料试验机，表示该试验机是多功能、液压式加载、最大载荷为 100 kN。

材料试验机的构造分成四大部分：

- (1) 加载部分 对试件施加载荷的机构，有两种加载方式，即机械式和液压式；
- (2) 测力部分 指示试件受载大小的机构；
- (3) 夹头 安装试件的机构。常用的夹头有拉伸、压缩和弯曲三种；
- (4) 绘图装置 试验过程中用以绘制载荷与试件变形曲线 ( $P-\Delta l$  曲线) 的机构。

## §1-2 机械式万能试验机

机械式万能试验机是一种常用的试验机，由机械传动或手摇加载，载荷容易控制。下面简要介绍 50 kN 机械式万能试验机。

### 一、工作原理与构造

工作原理如图 1-1。

各部分构造分述如下：

#### 1. 加载部分

加载部分由电动机、变速箱、蜗杆蜗轮、丝杠和活动试台组成。电动机 7 启动后，通过变速箱 9、蜗杆蜗轮 22 带动丝杠上、下移动，丝杠向下移动，夹头 3、4 间的试件受拉；丝杠向上移动，试件则受压、剪切或弯曲。

手摇加载时，将离合器手柄 6 扳到“手动”位置，摇动手柄 12，由小蜗杆蜗轮带动丝杠上、下移动，使试件受压或受拉。

若需调整加载速度，可转动调速手轮 10，改变无级变速轮的摩擦半径。调好后，再拧紧手柄 11，以免位置变动。调节加载速度，必须在电动机启动后才能进行。

#### 2. 测力部分

测力部分由杠杆系统 14、摆杆 16、摆锤 15 及指针机构、示力度盘 19 组成。当试件受拉时，杠杆 AB 绕支座 A 向下微小转动，并带动杠杆 CE 绕支座 C 向下偏转，摆杆摆锤偏



离初始垂直平衡位置，推动水平齿条杆 17 向左移动，并带动 齿 轮 24 及同轴的指针 18 转动，从而在示力度盘显示试件受力的大小。当试件受压，杠杆  $AB$  则绕支座  $B$  向上偏转，带动杠杆  $CE$  仍绕支座  $C$  向下偏转，其余传动过程与拉伸相同。

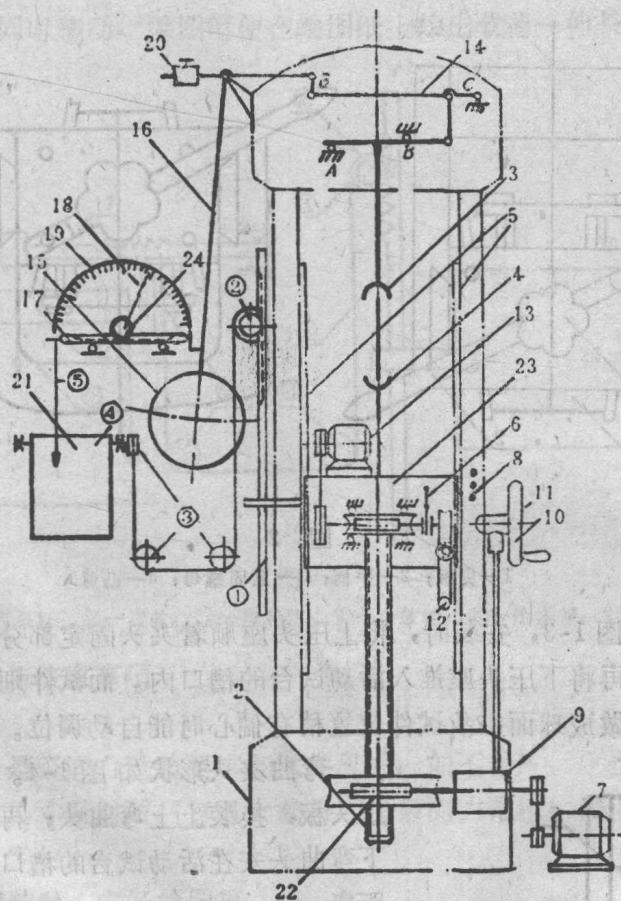


图1-1

- 1—底座，2—丝杠，3—上火头，4—下夹头，5—导轨，6—离合器手柄，7—电动机；8—电动机开关，9—变速箱，10—调速手柄，11—拧紧手柄，12—手摇柄，13—小电动机，14—杠杆系统，15—摆锤，16—摆锤，17—水平齿杆，18—指针，19—示力度盘，20—平衡锤，21—绘图装置，22—蜗杆蜗轮，23—活动试台，24—小齿轮，①—齿条杆，②—小齿轮，③—滑轮组，④—小鼓轮，⑤—绘图笔

测力范围由摆锤重量来调节。试验机有三块摆锤重量， $A$ 、 $B$ 、 $C$ ，配成三组： $A$ 、 $A+B$ 、 $A+B+C$ ，与之相对应，示力度盘有三圈刻度，表示三个量力范围，两者对应关系如下：

| 摆锤重量    | 量力范围               |
|---------|--------------------|
| $A$     | $0\sim10\text{kN}$ |
| $A+B$   | $0\sim25\text{kN}$ |
| $A+B+C$ | $0\sim50\text{kN}$ |

由此，根据所需的量力范围来选择摆锤重量。

### 3. 夹头

拉伸夹头的形状如图 1-2，用于作拉伸试验。夹头的夹板有槽口形和平板型两种，前

者用于圆形截面试件的试验，后者用于平板的试件。安装时，将夹头的凸缘对着夹头固定部分的导槽用手轻轻推入。安装试件时，先拧松紧固螺母，抬起手柄，把试件放入夹头的夹片内，对好中心，再拧紧紧固螺母。

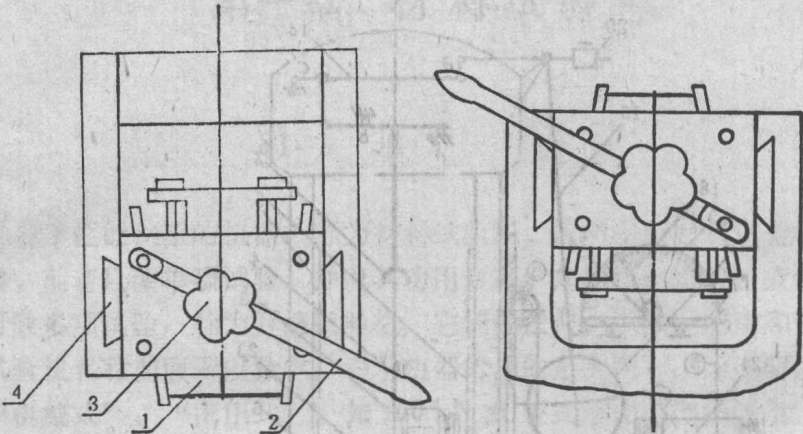


图1-2

1—夹板，2—手柄，3—紧固螺母，4—凸缘

压缩夹头的形状如图 1-3，安装时，将上压头座顺着夹头固定部分的导槽推入，拧紧压头座上部的大螺母；再将下压头座推入活动试台的槽口内。而试件则安装在上、下压头板之间。由于下压头板做成球面，故试件位置稍有偏心时能自动调位。

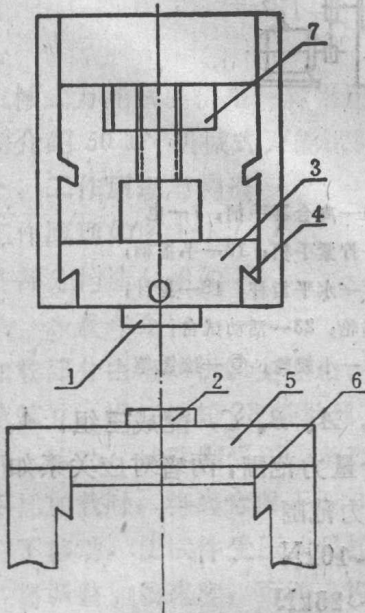


图1-3

1—上压头板；2—下压头板；3—上压头座；4—夹头导槽；5—下压头座；6—试台槽口；7—螺母

弯曲夹头形状如图 1-4。安装时，先取下上压头板，换装上上弯曲头；再取下下压头座，把下弯曲头安在活动试台的槽口内，并调好支座的距离。

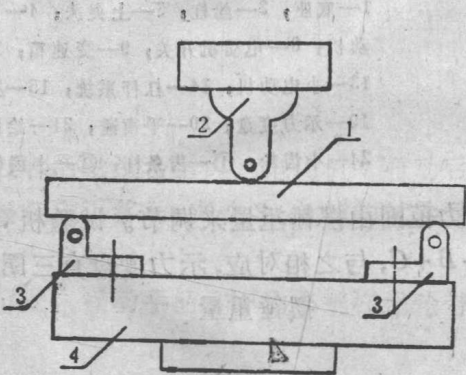


图1-4

1—试件；2—上弯曲头；3—支座；4—下弯曲头



#### 4. 绘图装置

绘图装置的工作原理如图 1-5。当活动试台 23 上、下移动时，带动齿条杆①上下，通过小齿轮②、滑轮组③的传动，使小鼓轮④转动，于是，绘图纸移动，移动的距离表示放大的试件变形。另外，在水平齿条杆 17 上安有绘图笔⑤，其水平位移表示载荷的大小。当绘图笔和绘图纸同时移动，绘图笔便在绘图纸上绘出载荷—伸长曲线（ $P-\Delta l$  曲线）。

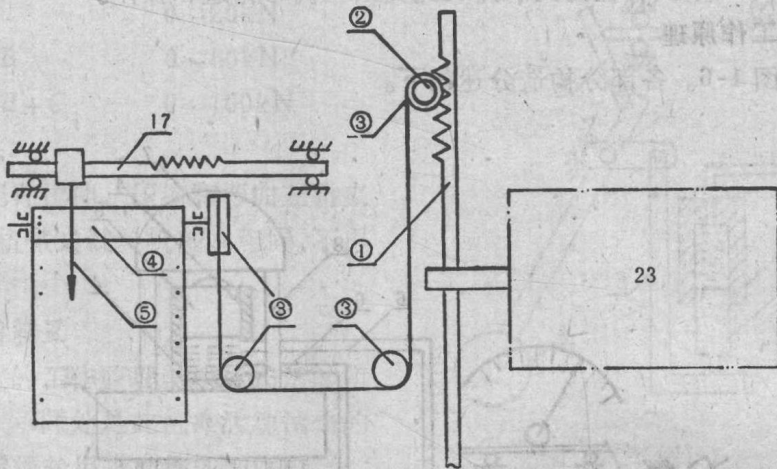


图1-5

①—齿条杆；②—齿轮；③—滑轮组；④—小鼓轮；⑤—绘图笔；23—活动试台

## 二、操作步骤与注意事项

### 1. 操作步骤

- ① 检查夹头是否适合试验要求和试件尺寸，如不合适，应当更换。
- ② 根据试件尺寸及材质估算最大载荷，选择测力范围，挂上相应的摆锤配重。再将示力度盘的指针对零位。
- ③ 检查绘图装置，安好绘图笔、纸。
- ④ 接通电源。电源开关有三个：“上”、“停”、“下”，分别为活动试台上行、停止、下行的开关。
- ⑤ 选择加载。离合器手柄有三个位置：“快”、“慢”、“手摇”，分别连通活动试台快速运行、慢速加载、手摇加载。
- ⑥ 安装试件。
- ⑦ 按先手摇后慢速顺序加载。
- ⑧ 试验完毕，恢复机器原状。

### 2. 注意事项

- ① 驱动活动试台快速运行的小电动机只能用于调距，不得用于加载或卸载。
- ② 在操作过程中，若要改变活动试台运行方向（由上变下，或由下变上），必须先按停止开关，切断电源，再按反向开关。
- ③ 转换离合器手柄时，不要开动电动机。在扳向手摇加载位置时，可同时摇动手摇柄，以便离合器啮合。

### §1-3 液压式万能试验机

液压式万能试验机为油压加载，油压系统由手轮控制，操作方便，但不易控制载荷。此类试验机可做金属、非金属材料的拉伸、压缩、剪切和弯曲试验。

下面以 WE-100 型试验机为例，说明此类试验机的构造和操作。

#### 一、构造与工作原理

工作原理如图 1-6。各部分构造分述如下。

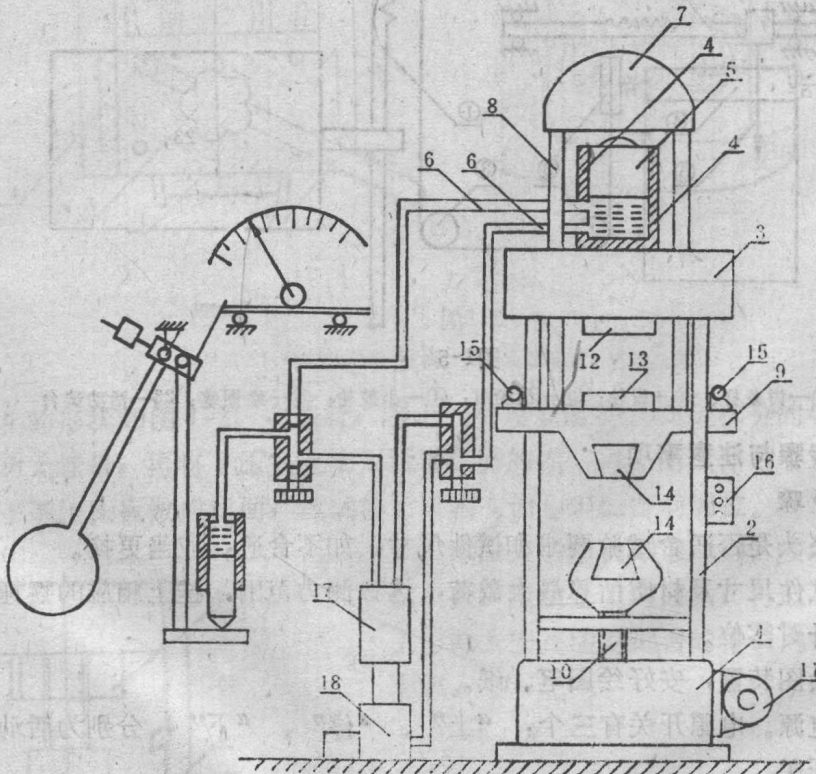


图1-6

1—底座；2—立柱；3—横梁；4—油缸；5—活塞；6—输油管；7—小横梁；8—吊杆；9—活动试台；10—丝杠；11—电动机；12、13—上、下压头；14—拉伸夹头；15—弯曲头；16—开关；17—油池；18—油泵

#### 1. 加载部分

加载部分由电动机、油泵、工作油缸、活塞、回油池等组成。当油泵输出的高压油进入工作油缸 4 后，推动活塞 5 连同小横梁 7、吊杆 8 及活动试台 9 一起上升，安装于夹头 14 的试件受拉；而安装于压头 12、13 之间则受压；置于弯曲头 15 上则受弯。

下钳口座的位置由电动机 11 带动蜗杆蜗轮、丝杠 10 上、下移动，以适应不同长短的试件。

#### 2. 测力部分

测力部分由测力油缸、活塞、摆锤、示力度盘等构成，如图 1-7。加载时，工作油缸



中的高压油经输油管6进入测力油缸1内，推动测力活塞向下，由拉杆3使摆锤绕支点7转动而逐渐抬起，于是，固定于摆杆上的压板4推动水平齿条杆5，带动齿轮及指针9转动，由指针在示力度盘上指示的刻度即表示加于试件上载荷的大小。

示力度盘有三个测力范围，由摆锤配重来调节，其间的对应关系为：

| 摆锤配重  | 测力范围    |
|-------|---------|
| A     | 0~20kN  |
| A+B   | 0~50kN  |
| A+B+C | 0~100kN |

### 3. 夹头

试验机配有拉伸、压缩和弯曲三种夹头，其构造与机械式试验机基本相同，不再介绍。

### 4. 绘图装置

绘图装置的工作原理与机械式试验机的基本相同，不同处是此机靠活动试台的移动通过线索滑轮组带动绘图纸筒转动。

## 二、操作步骤与注意事项

### 1. 操作步骤

- (1) 根据试验要求和试件形状选择夹头，安好。
- (2) 根据试件的尺寸及材质，估算试件的破坏载荷大小，选择测力范围，挂上相应的摆锤配重，将示力度盘的指针拨到零位。
- (3) 检查绘图装置，装好绘图笔和绘图纸。

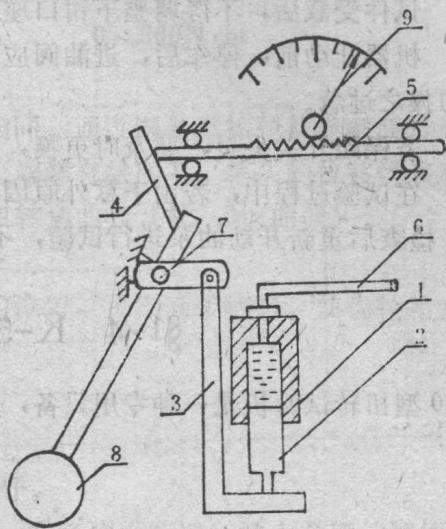


图1-7

1—测力油缸；2—测力活塞；3—拉杆；4—压板；5—水平齿条杆；6—输油管；7—支点；8—摆锤；9—指针

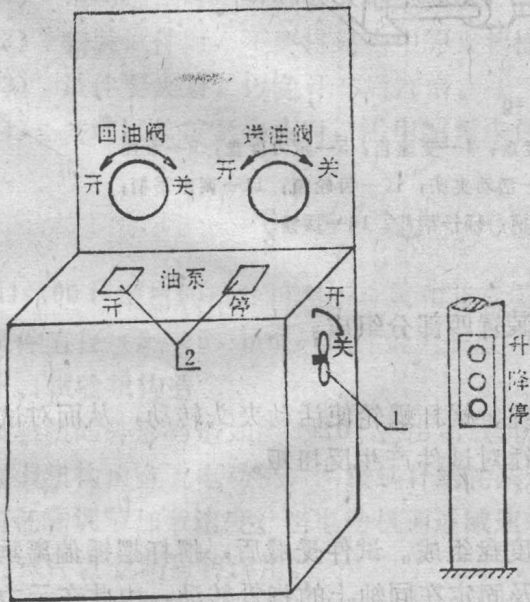


图1-8

1—总开关；2—油泵电动机开关

(4) 操纵开关如图1-8。立柱上的开关是用来调整下钳座位置的，共有三位：升、降、停，分别表示下钳座上升、下降和停止。若需调正下钳座高度，只要按下“升”或“降”开关即可。

(5) 将总开关置于“开”，接通电源，再开动油泵。

(6) 安装试件。拉伸试验时，先拧开送油阀，使工作活塞升起到适当的位置，然后关闭送油阀，将试件的一端夹于上钳口，对准指针零点，再调整下钳口，夹住试件下端。

(7) 拧开送油阀，对试件加载。

(8) 试件破坏后，关闭送油阀，停止油泵电动机，打开回油阀，把工

作油缸的油泄到油池，使活动试台回到原位。

(9) 取下破坏的试件，关掉电源，恢复试验机原状。

## 2. 注意事项

(1) 试件受载后，不得调整下钳口座的位置，以防烧坏电动机。

(2) 机器开动前，停车后，进油阀应置于关闭状态。加载、卸载和泄油均应缓慢进行，切勿操之过急。

(3) 若保险开关失灵，要及时更换，否则，不宜进行试验。

(4) 在试验过程中，若由于意外原因，油泵突然停止工作，则应先将载荷卸掉，使油压降低，检查后重新开动油泵进行试验，不应在高压下起动，以免产生意外损坏。

## §1-4 K-50型扭转试验机

K-50型扭转试验机是一种专用设备，只能作扭转试验，其外形如图1-9。

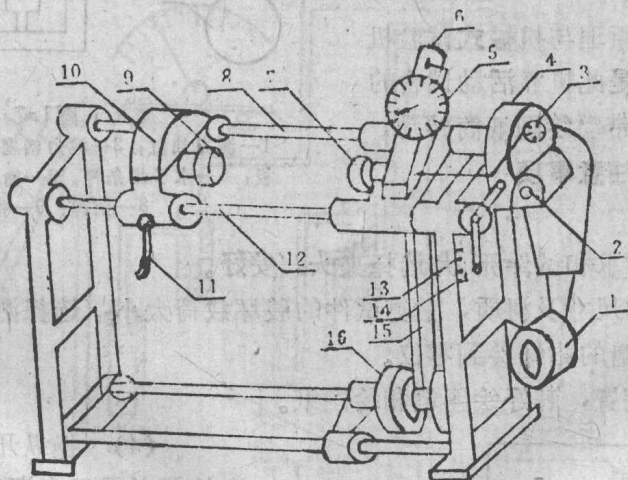


图1-9

1—电动机；2—变速杆；3—测扭转角度盘；4—变速箱；5—示力度盘；6—绘图装置；7—固定夹头；8—传动主轴；9—活动夹头；10—齿轮箱；11—调距手柄；12—光轴；13—电动机开关；14—手摇柄；15—摆杆；16—摆锤

### 一、构造及工作原理

扭转试验机由加载、测力、夹头和绘图装置四部分组成。

#### 1. 加载部分

由电动机1通过皮带轮对、齿轮变速系统、蜗杆蜗轮使活动夹头转动，从而对试件施加扭矩，试件另一端由于摆杆的抬起致使摆锤对试件产生反扭矩。

#### 2. 测力部分

测力机构由摆杆摆锤、齿条齿轮及示力度盘组成。试件受载后，摆杆摆锤偏离垂直平衡位置，推动齿条杆向上移动，再带动齿轮及固定在同轴上的指针转动，由此在示力度盘上读出加于试件扭矩的大小。

示力度盘有三个测力范围，与摆锤配重的对应关系为：



摆锤配重

A

A+B

A+B+C

测力范围

0~100N·m

0~200N·m

0~500N·m

### 3. 绘图装置

绘图装置的工作原理与机械式万能试验机相同。通过钢丝摩擦轮使卷纸筒转动，其转过的角度代表一定大小的扭转角；另在齿条杆上端装有绘图笔，笔尖的位移代表加于试件的扭矩，两者同时移动绘出的曲线就是扭矩—扭转角曲线（ $M_K-\Delta\varphi$  曲线）。

### 4. 夹头位置的调整

为适应不同长度的试件，需调整活动夹头的位置，可摇动手柄11。使齿轮箱左右移动即可。

## 二、操作步骤及注意事项

### 1. 操作步骤

- (1) 由试件尺寸选择合适的夹头型号，装好。
- (2) 由试件尺寸及材质估算最大破坏扭矩，选择测力范围，挂上合适的摆锤配重。
- (3) 调好测力度盘指针及扭转角指示器基线，对好零点。
- (4) 安装试件，夹紧。
- (5) 安装绘图纸和绘图笔。
- (6) 加载。钢材试件先用手摇加载，屈服后改用慢速，最后用快速。铸铁试件一直用手摇加载。
- (7) 试件扭断后，停车，取下破坏的试件，恢复试验机原状。

### 2. 注意事项

- (1) 电动加载时，务必要取下手摇柄，若需改变加载速度，应先停车。
- (2) 安装试件时，不要将夹头中的夹板槽突出太多，以防止脱落。
- (3) 试件要夹紧，以免开车后打滑。
- (4) 安装试件拧紧夹头时，需用配重卡住摆杆，待夹头拧紧后，再移开配重。

## §1-5 NJ-100B型扭转试验机

NJ-100 B 型扭转试验机用于金属和非金属材料的扭转试验，最大扭矩为 1000 N·m。容许试件直径（5~25）mm，试件最大长度为 620 mm。

### 一、试验机构造

试验机的外形构造如图 1-10。它由加载机构、测力机构、夹头和记录装置四部分组成。

加载机构由直流电动机、两级蜗杆蜗轮减速箱组成，可以正反两个方向加载，加载过程中可任意调节加载速度。当电动机通过减速箱带动其输出轴端部的夹头转动时，装在夹头内的试件就受到扭转作用。

测力系统采用电子自动平衡装置，当夹头内的试件受到扭转作用后，便通过差动变压器、伺服电动机及杠杆系统使示力度盘的指针转动，在度盘上指示试件受到扭矩的大小。示力度盘有四个，量程范围分别为 0~100 N·m、0~200 N·m、0~500 N·m、

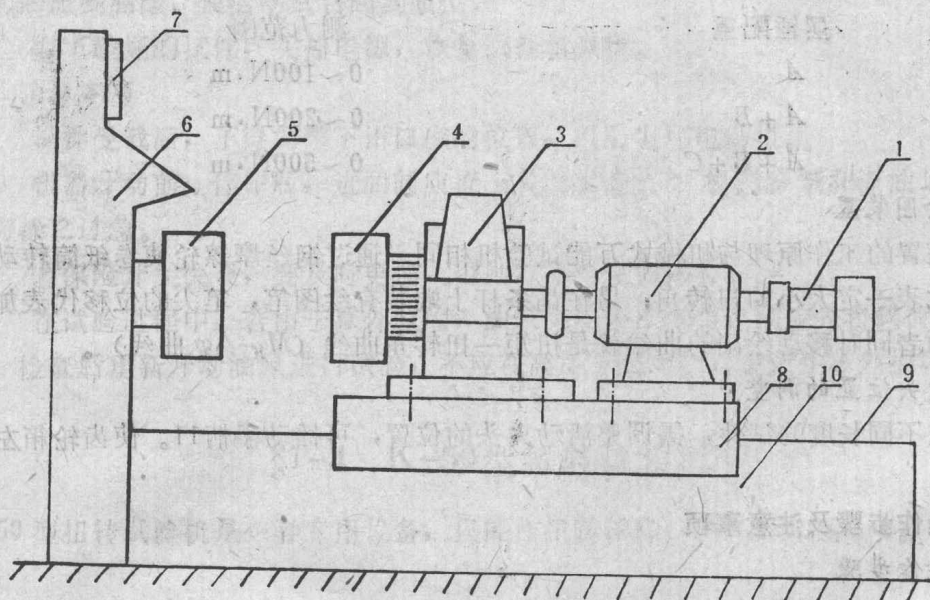


图1-10

1—测速电动机；2—电动机；3—变速箱；4—夹头；5—夹头；6—操纵箱；  
7—示力度盘；8—溜板；9—导轨；10—底座

0~1000 N·m。在测力系统中，有一个改变测力杠杆支点位置的机构，不同的支点位置对应不同的量程范围。

记录装置的原理与万能试验机相同，不再赘述。

NJ-100B 型扭转试验机的操作旋钮及开关都集中于一块板面上，如图 1-11。

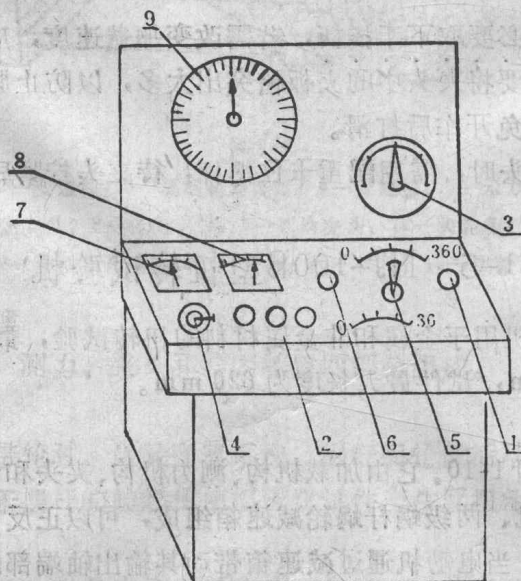


图1-11

1—电源开关，2—电动机开关，3—量程选择旋钮，4—记录器开关，5—加载速度调节旋钮，  
6—复位开关，7—电流表；8—速度表；9—示力度盘



电动机开关有正、停、反三个旋钮，以接通电动机正转、停止、反转，加载速度调节旋钮有二个档次，在板面上用  $0\sim 36^\circ$ 、 $0\sim 360^\circ$  标注，分别表示转速范围为  $0\sim 151.2$  转/分和  $0\sim 1512$  转/分。复位开关起到一种闭锁的作用，当载荷作用于试件后，只有按下复位开关，才能卸载。

## 二、操作步骤和注意事项

试验机操作步骤如下：

- (1) 根据试件的尺寸，选择夹头和衬套，安装试件。
- (2) 由试件有效部分的直径、材质，估算试件被扭断时的最大扭矩，选择合适的示力度盘。
- (3) 试验时若需绘制扭矩—扭转角 ( $M-\Delta\varphi$ ) 曲线，则需打开记录器开关。
- (4) 试验时若需调节加载速度，可将开关 5 拨到  $0\sim 36^\circ$  或  $0\sim 360^\circ$  的位置。
- (5) 加载。先用低速加载，待达到一定变形后，再调到所需速度进行加载。对于铸铁试件，可一直用慢速加载，直至断裂。对于低碳钢试件，只有在材料达到屈服极限后，才改用高速加载，直至试件扭断。
- (6) 记下扭矩读数和扭转角读数。
- (7) 取下扭断的试件，恢复机器原状。

注意事项：

- (1) 加载后，禁止拧动量程选择旋钮。
- (2) 试验时，若发现电流表指针剧烈摆动，应立即停车，检查出原因并修复后再启动做试验。
- (3) 拧动加载速度调节旋钮时要缓慢，使变速缓慢进行。
- (4) 保持滑动导轨台面清洁，防止损伤。

## 第二章 变形测量仪表

### § 2-1 概 述

材料力学实验中,经常要求测出试件的变形或位移,用以测量试件的变形或位移的仪表称为应变仪或引伸仪。

应变仪有机械的、光学的、电学的。应变仪由三个基本部分组成,即:

①传感器 用以感受试件变形的机构,它与试件表面直接接触。

②放大系统 将感受的变形加以放大的机构。

③显示部分 用以显示或记录变形的机构。

各种应变仪有三个主要的参数,即标距、放大倍数和量程。

标距是应变仪感受线变形的长度范围,通常,从显示部分显示的读数只是传感器标距内测到的变形,不包括标距外的变形。当试件的变形均匀,则可采用大标距的传感器;否则,应采用小标距的传感器。

放大倍数定义为显示度盘的变形读数  $\Delta A$  与实际变形  $\Delta l$  之比,即

$$K = \frac{\Delta A}{\Delta l}$$

可见,  $K$  值越大,应变仪的灵敏度越高。请注意,由仪表显示度盘读出的变形是放大  $K$  倍后的数值。

应变仪能测量变形的最大范围叫量程,量程越大,应变仪可测量的变形范围越大。

下面介绍三种常用的仪表:千分表引伸仪、杠杆引伸仪和电阻应变仪。

### § 2-2 千分表引伸仪

千分表引伸仪由千分表和传感固定架组成,常用来测定圆形试件的弹性模量和绘制载荷伸长曲线。

#### 一、千分表

千分表的构造如图 2-1。

当触头 1 感受变形后,齿条杆 3 便上、下移动,并带动齿轮 4、5、6 转动,固定在轮 6 上的度盘指针一起偏转,从而由度盘刻度读出位移。

度盘刻度表示放大后的位移读数,大圈分成 100 个小格,每小格表示位移为 0.01 mm,小圈有若干个小格,每小格表示位移为 0.5 mm 或 1 mm。大指针绕大圈转一周,小指针在小圈上偏转 2 个或 1 个小格,这种精度的千分表也称为百分表,其量程为 5~10 mm,更精密的千分表是大圈每小格表示位移为 0.001 mm,量程 1~5 mm。



## 二、传感固定架

传感固定架用来感受和传递试件的变形，并将测量仪表固定于试件上。图 2-2 是一种测量圆截面试件变形的传感固定架。

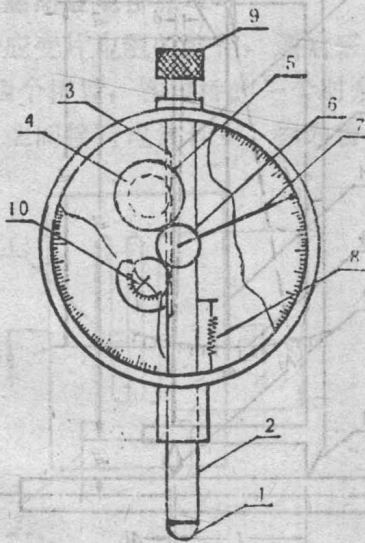


图 2-1

- 1—触头，2—顶杆，3—齿条杆，  
4—齿轮，5—，6—齿轮，7—大指针，  
8—弹簧，9—螺帽，10—量程指针

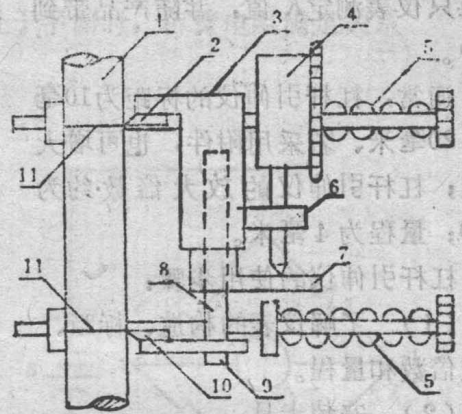


图 2-2

- 1—试件，2—上刀刃，3—导套，4—千分表，  
5—弹簧，6—支架，7—顶杆，8—滑块，  
9—固定螺钉，10—下刀刃，11—标距线

试验时，将刀刃卡在试件的标距横线上，因为上刀刃 2 与导套 3、支架 6 固装成一体，而下刀刃 10 则与滑块、顶杆固装成一体，两体之间嵌入滚珠，以便相对滑动。当试件伸长或缩短时，刀刃随标距横线产生相对位移，并传给支架和顶杆，压缩或松开千分表的触头，于是，千分表度盘的指针偏转，由此，读出试件标距线之间的变形。

为了适应不同的标距，可拧出螺钉 9，更换不同长度的标距杆。

传感固定架靠弹簧卡具 5 固定在试件上。安装时，先用拇指压缩弹簧，待装好后再松开弹簧，靠它的弹力将传感固定架牢牢地卡在试件上。

## § 2-3 杠杆引伸仪

杠杆引伸仪是一种广泛应用的机械式测量仪表，具有结构简单、安装方便等优点，图 2-3 是其结构示意图。

试验时，固定刀刃和活动刀刃卡在试件上，其间距离  $l$  称为标距。试件变形后，活动刀刃绕上支点转动，与之连成一体 的杠杆 6 也随着偏转，并带动 T 形连杆 5，推动指针 4 绕支点 7 偏转，从而由刻度盘上指针偏转的距离读出试件标距内的变形。

活动刀刃、杠杆 6、连杆、指针是一个放大系统，刻度盘上的读数  $\Delta A$  为放大后的变形值，它与真实变形  $\Delta l$  之比为杠杆引伸仪的放大倍数，用  $K$  表示，即

$$K = \frac{\Delta A}{\Delta l} \quad (2-1)$$