

材料力学测试原理及基本实验

何爱军

北方工业大学

二〇〇一年二月

学生实验规则

一、学生实验前,必须按实验的要求做好预习,明确实验目的,方法和步骤,做好准备工作,经教师检查后方可进行实验。迟到者,不得参加实验。

二、学生听从教师指导,严肃认真地进行实验,实事求是地做好实验记录。

三、实验时不准动用与实验无关的仪器设备,不得动用他组的仪器,工具,元件与材料。

四、实验时要注意安全,严格遵守操作规程进行实验,遇到事故应立即采取安全措施,并及时向指导教师报告。

五、做完实验必须整理好仪器、设备,经教师检查后,方可离开实验室。

六、实验报告必须自己独立完成,不符合要求的实验报告必须退回重做。

七、因无故旷课,迟到缺做的实验,一律不予补做,成绩为零。因病、事假缺做的实验,可由任课教师安排时间补做。

八、实验室内必须保持安静,不准高声喧哗,不准吸烟,不准随地吐痰和乱抛纸屑等物。

九、爱护仪器、设备和工具,节约水、电和材料。因责任事故损坏仪器、设备和工具者,均应检查其原因,做出书面检查报告,并视具体情节按规定赔偿。

十、凡违反实验室有关规定者,教师有权令其停做实验,情节严重者,教师要及时向有关部门报告,以便做出处理。

前 言

材料力学实验是材料力学课程的一个重要组成部分。按其性质主要有以下三类实验。

一、测定材料机械性能及指标参数的实验

如拉伸、压缩等实验。通过这类实验可以了解有关材料的机械性能,并掌握材料性能指标参数的基本测定方法。这些是设计构件时所不可缺少的依据。

二、验证理论的实验

材料力学课程中在建立理论及其计算方法和公式时,往往是通过实验观察,做出一些理想假设,将实际问题抽象为理想模型来作为研究对象。如此所建立的理论 and 导出的公式能否用以解决工程实际问题,理论公式准确性如何,还需要通过实验来验证。

三、实验应力分析

在解决工程实际问题时,对于形状及受力情况都十分复杂的构件,关于它们的强度问题在理论计算上还未解决或者单靠理论计算不容易得到满意的结果时,常常借助于实验的方法来测定应力。实验应力分析的方法很多,如电测法、光测法等等。这里主要介绍工程上广泛应用的电测法。

从上述三个方面可见实验与理论分析一样是研究和解决材料力学问题所必不可少的重要手段。因此也是学习材料力学的重要环节。

本实验课是为了配合《材料力学》课程而开设的。其目的在于使学生使用试验机 and 仪表,掌握实验的原理和方法,深入理解所学理论知识,培养理论联系实际的工作作风,为培养分析问题和解决问题的能力提供必要的条件。

目 录

第一章 金属材料的力学性能及测试原理.....	(1)
一、金属材料拉伸时的力学性能	(1)
二、金属材料压缩时的力学性能	(5)
三、金属材料扭转时的力学性能	(6)
四、金属材料弯曲时的力学性能	(8)
第二章 电测原理及测试方法	(11)
一、应变计的工作原理与构造	(12)
二、测量电路——电桥的工作原理	(13)
三、电阻应变仪	(15)
第三章 实验设备	(17)
一、WES—100 型数显液压万能材料试验机	(17)
二、NDS—1 型电子式扭转试验机	(18)
三、NJ—100B 型扭转试验机	(20)
四、YJ—29 型静态电阻应变仪	(23)
第四章 基本实验	(25)
一、拉伸实验	(25)
二、压缩实验	(29)
三、扭转实验	(33)
四、弯曲正应力分布规律实验	(37)
五、主应力测量实验	(42)

第一章 金属材料力学性能及测试原理

金属材料的力学性能是由其内部微观结构决定的。但是应用微、细观模型直接定量地计算材料的力学性能参数,目前还做不到。因此,无论是力学的理论研究还是材料工程应用中所用到的材料力学性能,都还要依靠材料的力学实验来测定。为了得到强度、刚度设计的依据,必须掌握材料在外力作用下的各种力学性能。也就是材料的力学(机械)性能指标,它们都是由实验来确定的。这是材料力学测试的主要内容之一。这里分别讨论杆件受拉(压)、扭、弯各种基本变形时的力学行为及力学性能指标的测定方法。材料测试另一部分内容是验证材料力学的基本理论。如弯曲正应力分布规律,主应力测定等实验。通过这一章也可了解到如何通过实验验证材料力学基本理论。

一 金属材料拉伸时的力学性能

由于各种金属材料的内部构造不同,受力时的力学行为也不相同。各种金属材料按照其构成和力学行为,可以分为以低碳钢为典型材料的塑性材料和以灰口铸铁为典型材料的脆性材料两大类。

金属材料的拉伸试验,可参考国家标准 GB228—87 的有关指导。试验时取一定的标准试件,将载荷缓慢地施加于试件的两端,即相当于静载荷。试验时,须控制加载速度,否则将影响结果。

(一) 拉伸试件

为了排除尺寸因素对测试结果的影响,各种金属材料的拉伸试件均制成形状规范的标准试件。试件中间变形,受力均匀部分为试验观测段,其长度称为标距,记作 l_0 。标距内的加工尺寸,精度都有一定的要求。标准试件有圆截面和矩形截面两种。常用的是圆截面试件。其横截面直径 d_0 应按 $l_0 = 10d_0$ 或 $l_0 = 5d_0$ 选取。为了保证试件与试验机夹具间的有效连接,夹持部分直径和长度也有一定的要求。为减少夹持段和试验段截面改变引起的应力集中,过渡弧半径也有一定的要求。

非标准试件也能用来测试材料的力学性能。但所得到的测量结果,可能略有系统差异。测量结果可借工程应用参考。

通常用游标卡尺度量试件的几何初始尺寸,试件在万能材料试验机上加载,并获得有关数据。在常规下试验机的拉伸速度对试验结果有一定影响。一般来说,拉伸速度过快,测得的屈服点或比例极限应力 σ_p 会有不同程度的提高。

塑性金属材料屈服前,应使应力增加的速率约为 $3 \sim 30 \text{ MPa/s}$,具体要求可参看国家标准。材料屈服以后,只测定抗拉强度时,可适当加快加载速度,为了保证载荷的静力特性,试验过程中从一种拉伸速度换到另一种速度时,必须平稳且无冲击。

(三) 应力、应变曲线(或 $\sigma-\epsilon$ 曲线)

在常温下,将试件夹在试验机上,缓慢加载。记录加载过程中标距内的材料沿标长方向的伸长 Δl 与载荷 P 之间的关系。可由试验机的自动记录绘图装置绘制连续的曲线,或

用专用测试仪器测量出对应的点列 $(\Delta l, F, i = 1, 2, \dots, n)$, 将这些点顺序连接起来绘出 P 随 Δl 变化的函数曲线称为拉伸曲线(或拉伸图)。

拉伸曲线与试件的几何尺寸有关。若以 F 除以初始横截面积 A_0 , Δl 除以试件的标距 l_0 , 这样得到的曲线与试件尺寸无关, 因而可代表材料的力学性质。

定义: $\sigma = \frac{P}{A_0}$ 为工程应力

$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ 为工程应变

这样拉伸图, 则转换为应力——应变图, 也称工程应力——应变曲线。由于 A_0, l_0 均为常量, 故两图形状相同。

由于在拉伸过程中试件不断伸长, 因此 ϵ 不能代表每一瞬时的相对伸长。真实应变是:

$$\epsilon_r = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad \text{又} \because \epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad \therefore \epsilon_r = \ln(1 + \epsilon)$$

ϵ_r 为材料拉伸均匀变形时的真实应变。当拉伸出现颈缩现象时, 变形对于整个试件而言不是均匀的, ϵ_r 不能代表这时的应变。

如果考虑横截面积改变, 则真实应力为:

$$\sigma_r = \frac{P}{A_i} \quad (A_i \text{ 为加载过程中的横截面积})$$

塑性材料拉伸时的力学性能

(1) 低碳钢的拉伸

低碳钢拉伸时的应力应变曲线如图

按其力学行为可以分为四个阶段。

1. 弹性阶段

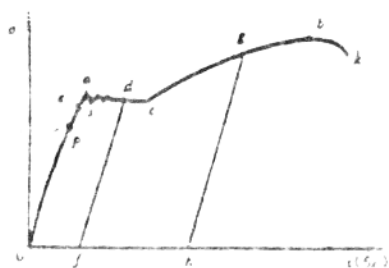
oa 线段内试件变形是弹性的, 卸力后试件即恢复原状。在 op 这一阶段内 σ 与 ϵ 间满足比例关系 $\sigma = E \cdot \epsilon$ 式中比例系数 E 称为材料的弹性模量, 其常用单位为 GPa 或 MPa 。它是材料表明应力与应变之间呈线性变化的特性系数。加载过程和重复加载时, σ 与 ϵ 仍保持原线性关系, 加载和卸载曲线是完全重合的。在 pe 这一阶段内应力与应变是非线性关系, 但材料仍保持完全弹性。

在此阶段可测定材料的两个极限应力值: 材料的比例极限 σ_p 和材料的弹性极限 σ_e 。它们分别表示材料从加载开始, 其 σ, ϵ 呈线性关系的最大应力和使材料保持完全弹性的最大应力。它们分别为上图中 p 点及 e 点对应的应力值。其值是工程应力, 计算如下:

$$\sigma_p = \frac{P_p}{A_0} \quad \sigma_e = \frac{P_e}{A_0} \quad \text{一般情况 } \sigma_p \text{ 与 } \sigma_e \text{ 是很接近的。}$$

2. 屈服阶段

此阶段曲线为 ebc , 对多数材料曲线走向是沿着一水平线上下波动, 并且波动幅度很快减小。其物理意义是在外力不再显著增加的情况下, 变形仍不断增大。从现象看, 这时材料已经“屈服”于外力的作用, 从微、细结构研究这一现象, 是由于构成金属晶体结构晶



低碳钢拉伸应力应变曲线

格间的“位错”在外力作用下发生有规律的移动造成的。此现象称为材料晶格滑移。这时如果仔细观察试件光滑的外表面,将看到沿着试件轴线成 45° 角的明暗相间的线条,称为滑移线。由于金属内部结构已经发生了变化,如果在屈服阶段卸载,材料只能恢复对应于弹性变形的那部分变形。而对应于因晶格滑移产生的那部分变形将不能恢复。图中指出了加载至d点的卸载曲线df,df是与初始加载直线段近似(几乎)平行的直线。卸载后重复加载材料的应力应变曲线是沿着fd的卸载直线恢复至卸载点“d”。继续加载将沿dc变化。屈服阶段一直延续到c点。d点对应的应变实际可分解为

$$\epsilon = \epsilon_{\text{弹}} + \epsilon_{\text{塑}}$$

式中 $\epsilon_{\text{弹}}$ 为弹性应变, $\epsilon_{\text{塑}}$ 为塑性应变。当卸载到f点, $\epsilon_{\text{弹}}$ 消失,保留 $\epsilon_{\text{塑}}$ 。

在此阶段可测得材料屈服极限 σ_s 。一般 σ_s 有幅度不大的波动,试样发生屈服而力首次下降前的最大应力称为上屈服点 $\sigma_{\text{上}}$ 。在不计初始瞬时效应时的最小应力称为下屈服点 $\sigma_{\text{下}}$ 。下屈服点较为稳定,不太受拉伸速度的影响。它们分别按下列公式计算:

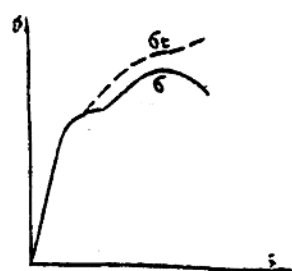
$$\sigma_s = \frac{P_s}{A_0}, \quad \sigma_{\text{上}} = \frac{P_{\text{上}}}{A_0}, \quad \sigma_{\text{下}} = \frac{P_{\text{下}}}{A_0}。$$

3 强化阶段

此阶段曲线是c点以后到b。在屈服阶段内材料晶格的滑移累积到一定程度后,滑移的阻力逐渐加大,滑移渐渐停止。所以c点以后即屈服阶段以后,欲使材料继续变形,必须不断施力。 σ 随着 ϵ 增大不成比例地逐渐增加。在此阶段内的某一点卸载再重复加载,如加载到g点后完全卸载gh,再加载时曲线将沿hgbk变化。此现象相当于材料的屈服极限有了显著增加。这种现象称为冷作硬化。冷作硬化相当于材料的线性阶段延长,没有了屈服现象,显著提高了以 σ_s 为破坏应力的塑性材料的指标数据。同时,因为这时材料已经发生了很大的塑性变形,与初始拉伸时的材料相比较也将减小一些发生塑性变形的能力。g点所对应的应变也可分解成 $\epsilon = \epsilon_{\text{弹}} + \epsilon_{\text{塑}}$ 。多数金属材料的大部分塑性变形都发生在强化阶段。此阶段的b点是整个工程应力应变曲线的最高点,对应的应力值称为材料的强度极限,用 σ_b 表示,计算如下:

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

值得注意的是在这个阶段(及下个阶段)内试件标距内的长度和横截面面积都发生了显著的变化。工程应力应变曲线已经不能准确地反映真实的应力和应变间的关系。 σ_e 与 ϵ 关系如右图



塑性材料工程应力与
真实应力—应变图

4. 局部变形阶段(颈缩阶段)

在此阶段bk内,由于试件上的某些局部缺陷(如:某截面较小,加工因素,材质因素等),使试件横截面的收缩集中在某个薄弱部分,在试件上形成一个缩颈(如下图a),这种现象叫颈缩。随着颈缩的继续,其缩颈部分越来越细,局部变形和真实应力也越来越大。试件的颈缩部的中心将发生最大轴向拉应力,且处于三向拉伸应力状态。按照强度理论,材料容易沿最大拉应力方向发生脆断。从拉断试件的断口形貌看,在断口中央最大拉应

力方向形成圆盘形状的晶粒粗糙的纤维区(如下图 b),所以中心首先引起断裂,而当其断开后边缘部分材料继续拉伸,使其在受剪应力最大的截面上剪切断裂,形成与轴线成 45° 方向的斜锥面断口,称为剪切唇。整个断口呈现“杯状”。

由于应力应变曲线中应力是按试件的 A_0 来计算的,因此当颈缩一出现,应力便达到它的最大值。它对应材料的强度极限 σ_s ,它是材料在拉伸下所能承担的最大应力,是工程设计中选材的重要依据之一。

为了描述材料塑性变形的能力,还定义了两个常用塑性性能参数,即材料的延伸率 δ 和断面收缩率 ψ

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

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

式中 l_0 、 A_0 为试件初始标距和横截面积;

l_1 、 A_1 分别为断开的试件按断口拼合后测定的标距和最细处(断口位置)的横截面积。

如断口不在中央三分之一部分内,则须进行折算计算 l_1 ,可参见规范测量指导。

如前所述为金属材料在静力拉伸荷载作用下,所表现出的主要力学性能的指标数据。

(2)其它塑性材料拉伸:

在各种塑性金属材料 ($\delta > 5\%$) 中,有些材料如低碳钢,一些中碳钢及低合金钢等,有明显的屈服现象,而也有很多塑性金属材料如青铜,铝等没有明显的屈服过程,这时不能确定屈服极限 σ_s 。由于 σ_s 是工程设计规范中,为限制塑性材料构件产生过大的塑性变形而采用的极限应力指标。所以,对这些塑性材料,人为地定义了一个相应的材料强度参数 $\sigma_{0.2}$,称为名义屈服极限。其意义是当材料发生 0.2% 的塑性应变时所对应的应力。这一塑性变形的大小,恰好和多数低碳钢材料对应于 σ_s 的塑性变形相当。

关于各种具体金属塑性材料拉伸过程的力学性能和指标数据测量,可参阅有关书籍。

(五)脆性材料拉伸时的力学性能

通常以伸长率 $\delta < 5\%$ 作为脆性材料定义的界限。这一类材料的共同特点是伸长率均很小。如灰口铸铁的 $\sigma-\epsilon$ 曲线(参看教材或其它参考书)没有明显的直线部分,没有屈服阶段和颈缩阶段,拉断前试件的变形很不明显,延伸率很小约为 $\delta_{10} = 0.5\%$ (δ_{10} 表示用 $l_0/d = 10$ 的标准试件测得);拉伸强度低,约为 $\sigma_s = 100 \sim 200\text{MPa}$;试件沿横截面拉断,断口粗糙。由于铸铁的 $\sigma-\epsilon$ 曲线无明显的直线段,通常用规定某一总应变时的割线来代替 $\sigma-\epsilon$ 曲线开始部分,从而确定其弹性模量 E ,并称之为割线弹性模量。

衡量脆性材料强度的唯一指标是材料的抗拉强度 σ_s 。因横截面面积的缩减极其微小,所以 σ_s 可看成真实应力。

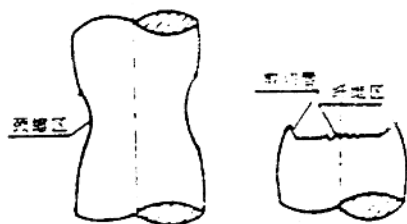


图3 拉伸试件颈缩及断口示意图

二 金属材料压缩时的力学性能

金属材料的压缩试验,可参考国家标准 GB7314—87 的有关指导。

塑性材料和脆性材料在单向压缩试验中具有显著不同的力学规律,将分别讨论。

(一) 压缩试件

压缩试件一般采用圆截面标准试件。有短试件(直径 $d_0 = 10 \sim 25\text{mm}$, 高 $h_0 = 1 \sim 3d_0$) 做破坏试验;长试件($d_0 = 25\text{mm}$, $h = 8d_0$, 规范有要求)做测定材料压缩弹性常数及微小的塑性变形的抗力试验,如测量材料压缩时的 σ_c 和 σ_{c0} 。为了保证试验过程中试件内材料发生较均匀的受力和变形,要求加工后试件的两个端面有很高的平行度和光洁度,还要求与试件轴线有很高的垂直度。

(二) 试验机及加载

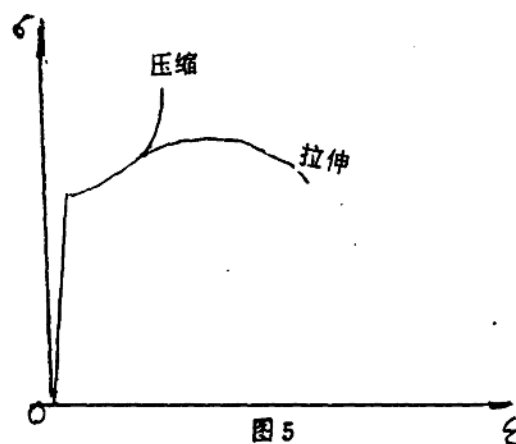
金属材料的压缩试验,也是使用万能材料试验机对试件进行位移控制加载进行。为了保证测试质量和试验机的安全合理使用,要求将试件准确地放置于试验机砧块的中心。为了减小试件与砧块间摩擦力对边缘区域应力状态的影响,应在接触面涂上润滑剂。

材料压缩时的力学性能可由测试过程中试验机所记录的力 P 与轴向压缩变形 Δl 间的压缩曲线来分析,也可以用由变换得到材料压缩时的应力应变曲线来分析。在测定压缩比例极限及弹性模量时试验机的速度应不超过 1mm/min 。

(三) 塑性材料压缩时的力学性能

由下图曲线 1 可以看出,在材料进入强化阶段的后期(这时试件的标距和截面积将发生显著改变)之前,塑性金属材料的压缩应力应变曲线与同一材料拉伸应力应变曲线几乎重合,只是在此之后两者才有显著区别。因而由压缩试验得到的材料弹性模量 E , 屈服极限 σ_s 等力学性能参数都近似与拉伸时所测试到的结果相同。

压缩后期,由于试件的标距和横截面积有了很大的改变,如果用真实应力应变重新绘制曲线,发现拉、压两条曲线将较为接近。而上图不是真实的应力应变曲线。可以预料塑性材料在单向压缩轴力的作用下,随着外力增大,试件越压越扁。这是由于材料的滑移引起截面的迅速加大。塑性材料压缩的力学性能参数 σ_s 、 $\sigma_{0.2}$ 、 σ_b 及 E 都可取自拉伸试验。由于塑性材料在压缩时,不出现断裂,因而没有 σ_c 数据。



(四) 脆性材料压缩时的力学性能

铸铁压缩时的应力应变曲线如图由线 1, 其特点是:

(1) 线弹性阶段部分很短, 需在弹性变形范围内, 确定最佳逼近直线, 取其斜率作为材料压缩弹性模量。

(2) 材料的强度极限取试验全过程横截面上的最大压应力, 也记为 σ_c 。

实验表明它的数值为同一材料拉伸强度极限的四到五倍。因此, 铸铁材料适合作为抗压构件。

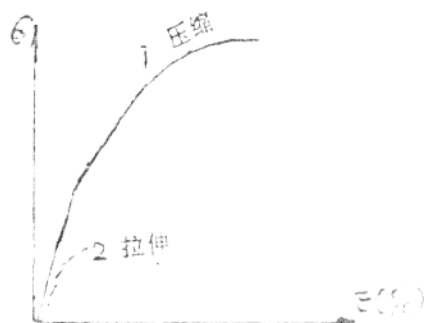


图 6

与铸铁拉伸比较, 其压缩试件能发生比应力大一些永久变形。

关于脆性材料试件受压破坏的原因, 是国内外正在研究, 争论的问题。对此传统的解释是: 由于通常脆性材料试件压缩破坏的断口是在与轴线成 $45^\circ \sim 55^\circ$ 的方向上, 这恰好是单向压缩材料的最大剪应力方向, 由此断言材料压缩时是由最大剪应力引起的剪切断裂。近年来国内外一些作者通过实验和理论分析提出了某些新的解释。认为: 脆性材料试件的破坏是个复杂的过程; 试件端面摩擦力是影响这一过程的敏感的重要因素; 材料在加载过程产生的内损伤是改变试件应力分布引起最终破坏的直接原因。

脆性材料压缩时, 由于应力应变曲线一般不遵守虎克定律, 其应力与应变成指数关系: $\sigma = E \epsilon^n$, 这里 ϵ 、 σ 是压应变、压应力, 而 E 为拉伸弹性模量, 同一材料 n 为常数。

三 金属材料扭转时的力学性能

金属材料的扭转试验, 可参考国家标准 GB10126—88 的有关指导。

塑性材料和脆性材料在承受扭转作用时, 也有显著不同的表现, 将分别讨论。

(一) 扭转试件

扭转试验所用的标准试件均用圆形截面试件 (实心圆或薄壁圆环), 标距分长 (100mm), 短 (50mm) 两种, 试件头部形状和尺寸应按试验机夹头形状制备。试件的具体形状及尺寸可参见有关指导。一般直径 $d = 10\text{mm}$, 其外形与拉伸试件相似。

(二) 试验机及加载

扭转试验常在专用的扭转试验机上进行。为保证测试质量在安装试件时, 要使试件严格对心, 使试件轴线与试验机扭矩轴线重合, 扭转速度的选定应符合国家标准的要求。一般脆性材料和塑性材料在屈服前均应以低速施加扭矩, 塑性材料屈服后, 可以提高扭转速度。

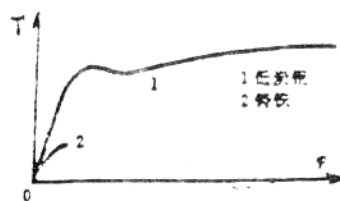


图 7 金属材料扭转 $T-\phi$ 曲线

在材料扭转试验中, 可由扭转试验机

绘制扭转外力偶矩或横截面扭矩 T 和试件标距 l_0 内相对扭角 φ 之间的“关系曲线”即 $T-\varphi$ 曲线, 见前图:

由于试件扭转时其横截面上是剪应力, 且按与轴心的距离 ρ 呈线性变化的非均匀分布, 因此截面上不同的 ρ 处, 其 τ_ρ 与 γ_ρ 数值均不相同, 通常将不去寻求材料的剪应力 τ 与剪应变 γ 之间的 $\tau-\gamma$ 曲线。但是也可通过分析的方法绘制应力应变曲线, 可参考有关方法。

(三) 塑性材料扭转时力学性能指标数据的测定

(1) 剪切弹性模量 G 测定:

在弹性范围内, 由 $\gamma(\rho) = \rho \frac{l}{l_0}$ $\tau = G\gamma$ $\tau_{\max} = \frac{T}{W_t}$

$$\therefore G = \frac{32 l_0 T}{\pi d^4 \varphi}$$

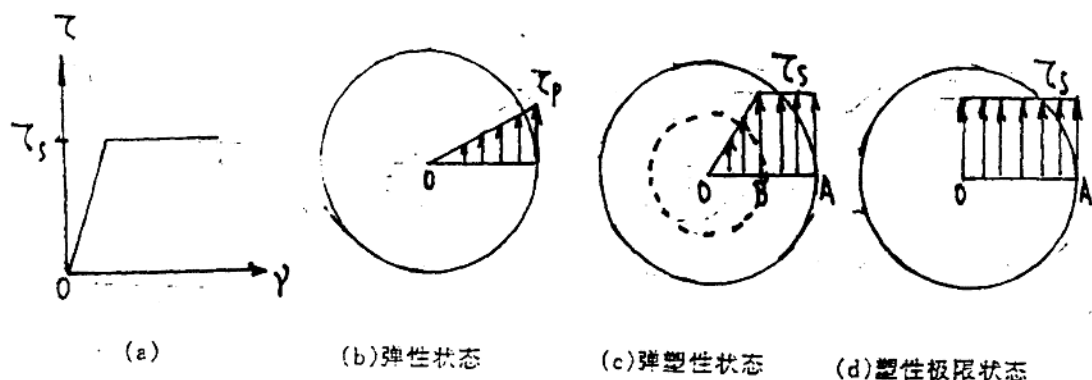
在 $T-\varphi$ 图的初始直线段内测量斜率 T/φ 代入上式, 可计算出 G 值。

(2) 材料的剪切屈服极限 τ_s 强度极限 τ_b 的测定。

对于低碳钢有明显屈服阶段(或屈服平台)的材料, 能应用理想弹塑性模型分析 T_s 。

自弹性阶段过渡到屈服阶段的图形, 采用经过简化的理想弹塑性模型情况下的 $\tau-\gamma$ 曲线, 即近似地用图(a)表示。

该曲线表明当剪应力不超过材料的剪切屈服极限 τ_s 时, 材料符合 Hooke 定理; 而当剪应力达到 τ_s 剪应变在此应力下不断增长。



圆轴截面上的应力分布

因此圆轴受扭在弹性变形范围内, $T < T_s$ 时, 截面上 OA 直线剪应力分布如图(b)。当 $T_s \leq T < T_b$ 时, 试件表面, 即横截面边缘处先达到屈服极限 τ_s , 材料发生屈服, 并逐渐向内扩展, 形成环形塑性区, 如图(c)中 BA 段。

此后试件继续扭转变形, 塑性区不断向内扩展, 至直接截面上的剪应力大小到处近似为 τ_s , 如图(d), 这时所受到的扭矩值为:

$$T_s = \int_A (\tau dA) \cdot \rho = \tau_s \int_A \rho dA = \frac{4}{3} \tau_s \cdot W_p,$$

$W_p = \frac{\pi d^3}{16}$ 是试件的弹性抗扭截面模量。

由此可得 τ_s 公式为:

$$\tau_s = \frac{3}{4} \frac{T_s}{W_p}$$

试件继续变形,材料进一步强化,达到 $T-\varphi$ 曲线顶点时,试件剪断。假设整个截面的剪应力都达到 τ_s ,此时最大扭矩为 T_s ,如前面推导一样可得 τ_s 的近似公式:

$$\tau_s = \frac{3}{4} \frac{T_s}{W_p}。$$

(3) 扭转屈服强度 $\tau_{0.3}$ 测定(规定非比例切应力的测定)。

用残余扭转剪切应变为 0.3% (相当于拉伸残余应变 0.2%) 的扭矩作为 $T_{0.3}$, 扭转屈服强度 $\tau_{0.3}$ 按下式计算:

$$\tau_{0.3} = \frac{T_{0.3}}{W_p} \quad (\text{MPa})$$

(4) 扭转相对残余剪应变 γ_r

对于塑性材料,因为塑性变形很大,弹性剪应变可以忽略不计。所以 γ_r 可由总应变计算:

$$\gamma_r = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)d_0}{2l_0} \times 100\%$$

$\varphi_1 - \varphi_2$ —— 相对扭转角(rad)

d_0 —— 试件平行长度部分的原始直径(mm)

l_0 —— 扭角仪标距,等于试件原始标距 l_0 (mm)。

(四) 脆性材料扭转时的力学性能指标测定

对于铸铁是脆性材料,如(二)中图示曲线 2, $T-\varphi$ 曲线近似为一直线。应力在截面上从开始受力直至破坏几乎都保持为线性分布,当边缘上的剪应力达到 τ_s 时,此时最大扭矩为 T_s ,故仍用弹性阶段的应力公式计算强度极限。因此剪切强度 τ_s 仍可近似地用圆轴受扭的应力公式计算:

$$\tau_s = \frac{T_s}{W_p}$$

这与塑材的 τ_s 不同。

对于脆性材料,因塑性变形很小,弹性变形不能忽略,所以必须从应变式中减去弹性切应变 γ_e 后得出残余切应变,而 $\gamma_r = \frac{\tau_s}{G} \times 100\%$,

$$\text{残余切应变 } \gamma_r = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)d_0}{2l_0} 100\% - \gamma_e$$

四 金属材料弯曲时的力学性能

金属材料的弯曲试验,可参考国家标准 GB232—88 的有关指导。生产上常用弯曲试

用来评定这些材料的抗弯强度及塑性变形的大小,这是弯曲试验的工程目的。

(一)弯曲试验

弯曲试件常用矩形截面梁作试件,有时也用圆截面试件。通常在万能材料试验机上装上三点弯曲或四点弯曲专用加载附件进行加载。其简图如下。

在加载过程中,试验机通过测量装置即可绘制出载荷 P 与试验机压头位移 f 之间的 $P-f$ 曲线。也可适当布置载荷,位移传感器及记录分析仪器,精确绘制载荷 P 与梁上指定截面的挠度 f 之间的变化曲线(通常是最大挠度 f)。 $P-f(f)$ 曲线称为试件的弯曲曲线。

由材力可知对图 b 四点弯曲梁在加载时中段横截面上正应力沿梁高成线性分布即

$$\sigma = \frac{M}{I} y$$

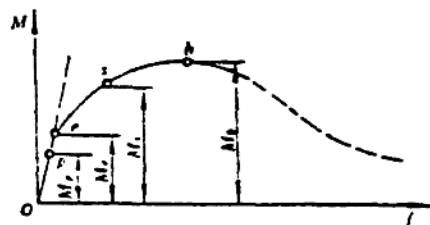
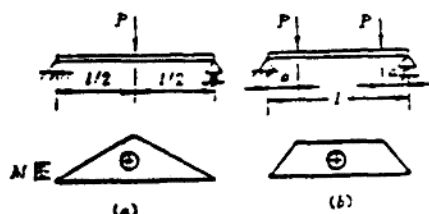
材料力学弯曲试验的内容之一是测量正应力值并与上述理论值相比较,以验证梁的理论。如基本试验四。

工程上也用弯曲试验来测定机件材料的力学性能,即测定结构件的力学性能。

(1) 塑性机件材料的弯曲试验及其力学性能(参看参考书 3)

一般塑性材料的弯曲曲线如下图:

从左图中可以看出,当试件进行到 p 点时,弯曲力矩 M 与挠度 f 保持正比关系。进行到 e 点时挠度 f 仍为弹性变形,超过 e 点,则除弹性变形外,同时将产生一定的塑性变形,到达 b 点时,弯曲力矩为最大值 M_b 。这一关系曲线和拉力伸长曲线及扭矩扭转角关系曲线相似。只是它们的坐标不同而已。图中 b 点以后的延长线说明塑性金属材料进行弯曲试验时,通常达不到断裂的程度。由此可见,对塑性金属材料,除特殊要求外,只测定其弹性极限,屈服极限,通常不进行抗弯试验。



塑性材料的弯曲曲线

(2) 脆性机件材料(铸铁)的弯曲试验

脆性材料弯曲试验中,随着载荷 P 的加大,试件会发生脆断如下图。

记录最大 P ,可算出断口处 M_{max} 值,可得到抗弯强度 σ_{bb} (bend biggest)

脆性材料弯曲试验的特点及应用如下:

1. 弯曲试验和拉伸试验相比,能明显地显示脆性材料的塑性。

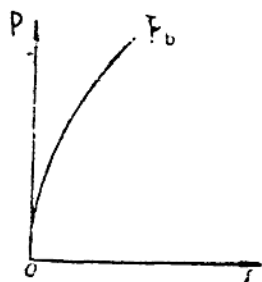
因为脆性材料塑性差,在做拉伸试验时变形较小就断裂了,因而塑性指标 δ 、 ψ 不易测定。但在做弯曲试验时,用挠度表示塑性,就能明显的显示脆性材料的塑性。

2. 弯曲试验不受试件偏斜的影响,可以较好测定脆性材料的抗弯强度。

3. 由于脆性材料在弯曲试验时,一般在弹性范围内仅产生少量的塑性变形,故可直接用理论公式计算

$$\sigma_M = \frac{M_{max}}{W_x}$$

对于塑性材料,虽然 b 点不能用上式计算,因为不满足线性弹性条件和小变形条件。

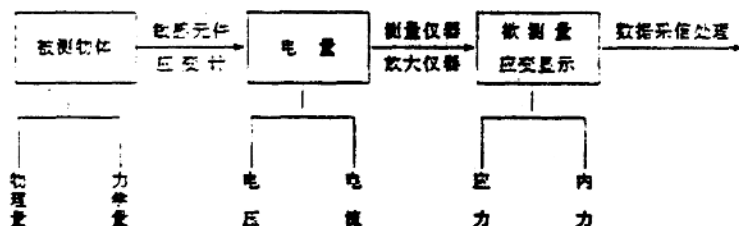


灰铸铁的弯曲曲线

第二章 电测原理及测试方法

目前, 材力测试中使用最广泛的电测方法是电阻应变计测量方法。

应变计电测技术是一种确定构件表面应力状态的实验应力分析方法。简称电测法。其原理是: 将电阻应变计(简称应变计, 俗称应变片)粘贴在被测构件表面上, 当构件受力变形时, 应变计的电阻值发生相应的变化。通过电阻应变仪(简称应变仪)测定应变计中电阻值的改变, 并换算成应变值显示出来或者输出与应变成正比的电信号, 用记录仪器记录下来, 就可得到被测量的应变, 其原理框图如下所示。



电测法之所以得到广泛应用, 是因为它具有如下诸方面的优点:

- (1) 应变计尺寸小, 重量轻, 一般不影响构件的工作状态和应力分布。
- (2) 灵敏度高。应变最小分辨率可达 1 微应变 ($\mu\epsilon = 10^{-6}$)。应变测量范围为 $\pm 1 \sim 10^4 \mu\epsilon$, 力的测量范围为 $10^{-2} \sim 10^5 \text{N}$ 等。
- (3) 能进行静、动态测量, 频响范围为 $0 \sim \pm 50 \text{kHz}$ 。
- (4) 可在高温、低温、高速旋转及强磁场等环境下进行测量。
- (5) 由于测量过程中输出的是电信号, 因此容易实现自动化, 数字化, 并能进行远距离测量和无线电遥测。
- (6) 通用性好。不但适用于测量应变, 而且可制成各种高精度传感器, 用于测量载荷, 位移加速度, 扭矩等力学量。

正因为电测法具有上述优点, 因而被广泛应用于各个领域:

- (1) 直接应用于工业生产的现场实测与控制。
- (2) 生产新产品前的模型设计实验。
- (3) 高技术, 现代科学领域中的应用, 如机器人工业, 原子能反应堆、航空、航天等方面的参数测试。
- (4) 应用于运动力学测试。
- (5) 制造各种传感器, 如力、位移、压力传感器等。

不过该测量方法也有它的缺点, 主要表现在只能测量构件表面某一方向的应变, 且应变计有一定标长, 只能测定某点在标长范围内的平均应变, 所以在测量点的应力参数时是近似的。

一 应变计的工作原理与构造

(一)应变计的工作原理

为了了解电阻应变计的工作原理,现介绍金属导线的电阻应变效应。即电阻值随导线的变形(伸长或缩短)而发生改变的一种物理现象。

设有截面积为 A 的金属导线,由物理学知其原始电阻为:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

ρ 为导线材料的电阻率, l 为导线长度,上式等号两边取对数再微分得到:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A}$$

由 $\epsilon = \frac{dl}{l}$, $\frac{d\rho}{\rho} = -\mu\epsilon$ μ 为泊松比

所以导线截面积改变为:

$$dA = \frac{\pi}{4}(D'^2 - D^2) = \frac{\pi l}{4}[D^2(1 - \mu\epsilon)^2 - D^2] \approx \frac{\pi D^2}{4}(-2\mu\epsilon)$$

这里 D' 是 D 变化后直径,且略去 $\mu\epsilon$ 的二次项。因为 μ 为 10^{-1} 数量级,线应变 ϵ 一般是 10^{-4} 数量级,则 $(\mu\epsilon)^2$ 为 10^{-10} 数量级,可忽略不计。所以有:

$$\frac{dA}{A} = -2\mu\epsilon$$

因此: $\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon + \frac{d\rho}{\rho}$

研究表明,金属导线受力变形时,在弹性范围内 $d\rho/\rho$ 正比于 ϵ ,

所以 $\frac{dR}{R} = K \cdot \frac{dl}{l} = K \cdot \epsilon$

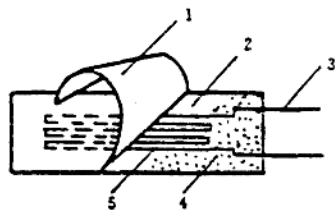
K 称为金属导线的电阻应变效应的灵敏系数。自然界有一些材料,在其产生 ϵ 的很大范围内,其 K 值是一个常数。

电阻应变计就是利用这些金属材料的电阻应变效应制成的传感元件。

(二)应变计的构造

将一条很细的具有高电阻率的金属丝绕成栅形,用胶水粘在两片薄纸之间,再焊上较粗的引出线,就制成了丝绕式应变计。常用的应变计由敏感栅,引出线,基底,覆盖层和粘结剂五部分组成,如左图。

敏感栅能将被测构件表面的应变转换为电阻的相对变化。由于它对被测量的应变的反映非常灵敏,故称为敏感栅。敏感栅是用合金丝或合金箔制成的栅。所以常用应变计分丝式应变计和箔式应变计。丝式应变计是用直径为 0.02mm — 0.05mm 的合金丝绕成栅状而制成。箔式应变计则是用 0.003mm — 0.01mm 厚箔材



丝绕式应变计

1—覆盖层; 2—基底; 3—引出线; 4—粘结剂; 5—敏感栅

经化学腐蚀性试剂。

如左图：

(三) 应变计的工作特性

应变计的工作性能的好坏直接影响应变测量的精确度，因此对应变计的性能提出了种种要求，常用的如下：



箔式应变计

(1) 应变计电阻

应变计未经安装使用前在常温下的电阻值。国产应变计已标准化，一般取 100Ω 或 350Ω 。制造厂对应变计逐个测量，并逐个注明阻值。（或名义平均值与平均值的偏差）

(2) 灵敏系数

应变计的灵敏系数用 K 表示

$$K = \frac{\Delta R/R}{\epsilon}$$

它与材料灵敏系数 K 不同，它是用应变计的成品（包括基底及封装部分）经过实际标定而得到的用于测试计算的参数。

应变计的制成品，当 ϵ 在一定范围内变化时，其灵敏系数 K 值应保证为一个不变的常数，使用时，被测构件产生的应变，不能超出此范围。

(3) 应变计的温度效应

由于温度变化时，金属丝（箔）的电阻值也随着产生变化，称为 $(dR/R)_T$ ，

$$(dR/R)_T = [\alpha_T + K(\beta_s - \beta_c)]dT$$

α_T —— 金属丝（箔）材料的电阻温度系数；

β_s —— 金属丝（箔）材料的热膨胀系数；

β_c —— 构件材料的热膨胀系数。

要准确测量构件的应变就要克服温度对电阻变化的影响。

测试中，对精度要求不高，或者温度变化不大者，给予忽略；否则将要采用“补偿法”予以消除。

应变计还有其它重要的工作特性如机械滞后，绝缘电阻，蠕变，应变极限，横向效应系数，疲劳寿命等可参考有关书籍。

(三) 应变计的粘贴

应变计的粘贴是电测法的一个重要环节。测试前，应按照构件与应变计的具体情况选择适用的专用粘接剂（有成品供选择），并按所用粘接剂的要求和工艺程序进行操作，以保证应变计在工作中，能切实与构件粘牢，一起变形。

二 测量电路——电桥的工作原理

测量电路的作用是将电阻应变计感受的电阻变化率 $\Delta R/R$ 转换成电压变化输出，再经放大电路放大。

测量电路有多种，最常用的是桥式测量电路，它有四个桥臂 R_1, R_2, R_3, R_4 顺序地接