

工程力学

(材料力学部分)

武汉水运工程学院力学教研组编

1973.8

△

目 录

绪论	1
§ 1 材料力学的任务	1
§ 2 杆件和杆件变形的的基本形式	1
第一章 拉伸和压缩	
§ 1—1 工程实际中的拉伸和压缩问题	3
§ 1—2 拉伸和压缩时的内力和应力	3
§ 1—3 拉伸和压缩时的强度条件	6
§ 1—4 拉伸和压缩时材料的机械性质	7
(一) 低碳钢的拉伸试验	7
(二) 铸铁的拉伸试验	11
(三) 压缩试验	12
(四) 塑性材料和脆性材料的比较	12
§ 1—5 安全系数和许用应力	15
§ 1—6 拉伸和压缩强度计算实例	16
第二章 剪切	
§ 2—1 工程实际中的剪切问题	20
§ 2—2 剪切的强度计算	21
§ 2—3 挤压强度计算	22
§ 2—4 剪切变形和剪应力的关系	25
第三章 扭转	
§ 3—1 工程实际中的扭转问题	26
§ 3—2 圆轴扭转时的外力和内力	26
§ 3—3 圆轴扭转时的应力	27
(一) 圆轴扭	28
(二) 剪应力	29
(三) 剪应力	29
(四) 极惯性矩与抗扭截面模量的计算	30
§ 3—4 圆轴扭转时的强度条件	31
§ 3—5 圆轴扭转时的变形和刚度条件	33
§ 3—6 提高扭转抗力的措施	34
§ 3—7 密圈螺旋弹簧	36
(一) 横截面上的应力	37

(二) 弹簧的变形.....	38
(三) 弹簧的强度条件.....	39
§ 3—8 非圆截面杆扭转的概念.....	39
第四章 弯曲强度分析	
§ 4—1 工程实际中的弯曲问题.....	41
§ 4—2 弯曲强度计算.....	42
一、梁的内力——剪力和弯矩.....	43
二、梁横截面上的正应力.....	46
三、正应力的强度条件.....	50
§ 4—3 剪力图和弯矩图.....	53
一、剪力图和弯矩图的画法.....	53
二、分布载荷 q 、剪力 Q 和弯矩 M 间的微分关系.....	58
三、按迭加法画弯矩图.....	63
四、减小最大弯矩的措施.....	64
§ 4—4 截面几何性质.....	65
一、截面的静矩和形心位置.....	66
二、简单图形的惯性矩.....	67
三、平行移轴公式.....	68
四、组合截面的惯性矩.....	70
§ 4—5 梁的合理截面形状.....	75
§ 4—6 梁弯曲时的剪应力.....	77
§ 4—7 弯曲与拉压组合变形的强度计算.....	80
第五章 弯曲刚度分析	
§ 5—1 工程实际中的弯曲变形问题.....	84
§ 5—2 弯曲变形分析和挠曲线近似微分方程式.....	85
一、挠度、转角和挠曲线的相互联系.....	86
二、挠曲线的微分方程式.....	86
§ 5—3 挠曲线近似微分方程的积分.....	87
§ 5—4 用迭加法求梁的变形.....	97
§ 5—5 提高梁弯曲刚度的措施.....	99
§ 5—6 静不定梁.....	100
第六章 复杂应力状态下的强度计算	
§ 6—1 轴向拉伸(压缩)时的斜截面上的应力.....	106
§ 6—2 圆轴扭转时的应力状态.....	108
(一) 分析单元体各侧面上的应力.....	
(二) 任意斜截面上的应力.....	
§ 6—3 弯曲与扭矩组合变形时的应力状态.....	110

§ 6—4 应力状态的分类	113
§ 6—5 三向应力状态时的最大应力	114
§ 6—6 广义虎克定律	115
§ 6—7 强度理论	116
§ 6—8 弯曲与扭转组合变形时的强度计算	120

第七章 交变应力下的强度分析

§ 7—1 工程中零件受交变应力的实例及分析	127
§ 7—2 交变应力下的危险应力——持久极限	129
一、对称循环时材料的持久极限	130
二、影响持久极限的因素	131
三、零件的持久极限	136
§ 7—3 交变应力下零件的强度计算	137
一、对称循环交变应力下的强度校核	137
二、非对称循环交变应力下的强度校核	140
三、弯扭组合交变应力下的强度校核	141
§ 7—4 提高零件疲劳强度的措施	144
一、减少应力集中的影响	
二、强化零件表面层	

第八章 压杆的稳定分析

§ 8—1 工程实际中的压杆稳定问题	146
§ 8—2 临界压力的计算	148
一、细长压杆的临界压力	148
二、欧拉公式的适用范围及超出此范围时的临界压力计算	151
§ 8—3 压杆稳定的实用计算	155
§ 8—4 压杆合理结构讨论	158
一、合理截面形状	
二、加固支座、减少杆长	
三、减小长细比 λ	

附录 型钢表

附表 1 热轧等边角钢	160
附表 2 普通低合金钢等边角钢	166
附表 3 热轧不等边角钢	167
附表 4 普通低合金钢不等边角钢	172
附表 5 热轧普通槽钢	173
附表 6 普通低合金钢热轧轻型槽钢	175
附表 7 热轧普通工字钢	176
附表 8 普通低合金钢热轧轻型工字钢	178

緒 論

§ 1 材料力学的任务

机器或结构物都是由許多构件組成的。例如柴油机由活塞、連杆、曲軸、螺釘等所組成，船体由縱桁、肋板、肋骨、橫梁、立柱等所組成。任何机器或结构物只有它的各个构件在載荷的作用下能够安全地正常地工作，才能保證整个机器或结构物安全地正常工作。要达到这个目的，首先要求构件在載荷的作用下不破坏。例如柴油机的曲軸如果因受載荷过大而断裂，就会造成整个机器停转，甚至造成严重事故；其次，构件在載荷的作用下即使不破坏，但是产生的变形超过一定的范围也不能保證机器或结构物正常工作。例如柴油机汽缸头上的螺釘在載荷的作用下产生的伸长变形太大，就会使缸体和缸头配合不紧密而发生漏气现象，又如車床上的絲杆在載荷的作用下弯曲变形太大就会影响工件的加工精度；此外，有些构件还要求在載荷的作用下不丧失原来的平衡形式，例如船体中的立柱在压力的作用下不能失去原来直綫状态的平衡形式而发生弯曲，否则立柱将因此而破坏。綜上所述，要保證构件安全地正常工作必須做到以下三点：

(1) 在載荷的作用下不破坏，工程上叫做具有足够的强度。

(2) 在載荷的作用下构件的变形不超过一定的范围，工程上叫做具有足够的刚度。

(3) 在載荷的作用下构件不失去原有的平衡形式，工程上叫做具有足够的稳定性。

从实践中知道：为了保證构件具有足够的强度、刚度和稳定性，使它能安全正常工作，只要选用較好的材料和較大的截面尺寸就能做到；但是从經濟的观点考虑，则希望选择較差的材料，和較小的截面尺寸。显然，在設計构件时，安全与經濟的要求是互相矛盾的。片面地追求經濟而忽視安全要求是絕對不允許的；但是过分地强调安全而忽視經濟方面的要求，随意增大构件尺寸，濫用优質材料，既浪費又笨重，也是不允許的。为了貫徹执行“鼓足干劲、力争上游、多快好省地建设社会主义”的总路綫，在工程設計中必須正确地处理安全与經濟的矛盾，材料力学就是为正确地解决这一矛盾提供必要的理论基础的一門課程。也就是說，材料力学的任务是要分析研究构件的强度、刚度和稳定性的計算理論和方法。

毛主席教导我們說：“一切事物中包含的矛盾方面的互相依赖和互相斗争，决定一切事物的生命推动一切事物的发展。”材料力学这门課程正是在安全与經濟这一对矛盾的互相依赖和互相斗争中产生和发展起来的。它使我们在設計构件时能选择恰当的材料和合理的截面尺寸。

§ 2 杆件和杆件变形的基本形式

工程实际中，构件的形状各式各样，十分复杂。材料力学主要研究杆件形状的构件。所谓杆件是指它的长度远大于橫向尺寸的物体（图1）。杆件各橫截面形心的联綫叫做杆的軸綫。

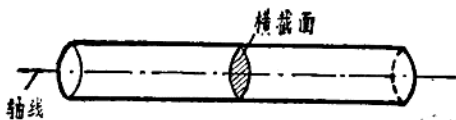


图 1

载荷作用在杆件上的方式不同，产生的变形形式也不同。杆件基本形式有下面四种：

- (1) 拉伸和压缩；
- (2) 剪切；
- (3) 扭转；
- (4) 弯曲。

现以工程中常见的另件为例，列表（表1）说明如下：

形式	工程实例	受力图
拉伸	 拉板	 拉板
压缩	 短柱	 短柱
剪切	 铆钉	 铆钉
扭转	 扭力轴	 扭力轴
弯曲	 吊车梁	 吊车梁

表 1

更复杂的变形形式可以看作是上面几种基本变形形式的组合。我们先研究较简单的基本变形，然后再研究较复杂的组合变形。

第一章 拉伸和压缩

§ 1—1 工程实际中的拉伸和压缩问题

工程实际中有许多构件在载荷的作用下产生拉伸和压缩的变形。常见的如起重机的钢索、船上的起货杆、连杆头部的螺钉、材料试验机上的立柱等。这些构件受力的特点是作用于杆上的外力的合力的作用线与杆的轴线重合（图1—1），所以这种变形又叫做轴向拉伸（或压缩），变形的特点是产生轴线方向的伸长或缩短。如果受力过大，构件将发生破坏。

构件受拉伸（或压缩）时的强度和那些因素有关呢？由实践的经验可知，主要的因素有以下三个方面。

- (1) 外力的大小；
- (2) 构件的横截面积的大小；
- (3) 材料的好坏。

我们的任务就是要研究构件的强度与这些因素之间的具体关系。

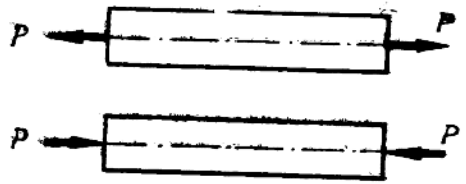


图 1—1

§ 1—2 拉伸和压缩时的内力和应力

构件受拉力作用后就产生变形，同时构件内部产生一种抵抗变形的力反抗外力的作用，阻止构件变形，这种在外力作用下而产生的构件内部的相互作用力，称为内力。我们用手拉弹簧，同时手也受到弹簧的反作用力，即弹簧对变形的抗力——内力，外力使弹簧变形，而内力则力图使弹簧恢复到原来的形状。外力增大，内力也随着增大。但是任何实际的构件内力的增大都有一定的限度，超过这个限度，构件就不能继续抵抗外力的作用而发生破坏。由此可见，杆件因外力作用而产生的内力的大小（它决定于外力与杆件的横截面尺寸）和杆件可能承受的内力的极限值（它决定于材料的机械性质）将决定构件的强度。因此，解决杆件的强度问题必须研究：

- (1) 怎样确定杆件因外力作用而引起的内力；
- (2) 怎样确定由某种材料制成的杆件可能承受的内力的极限值。

以后的研究就是围绕着这两个问题展开的。

怎样计算内力呢？我们借用理论力学中取脱离体的方法，先将内力暴露出来，然后用静力平衡条件把内力求出。现举例说明如下：

图1—2a所示的杆件受拉力 P 作用，求任一横截面上内力等于多少？

首先假想将杆件沿 mm 截面切为A、B两部分，取一部分（例如A部分）作为研究对象（脱离体）丢掉另一部分（例如B部分），而将B部分对A部分的作用以力 N 来代替。这个力就是截面 mm 上内力的合力。这样内力就暴露出来了。

因为杆件整体是平衡的，所以切开后的每一部分也应处于平衡状态。由平衡条件

$$\sum x = 0 \quad N - p = 0$$

得

$$N = p$$

这个内力的合力 N 与拉力 p 共线，即与杆的轴线重合，所以叫做轴向力。

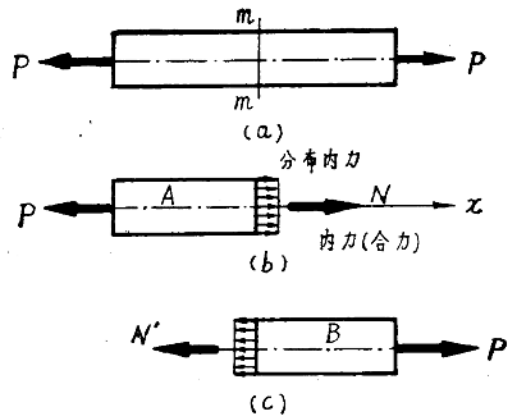


图 1-2

如果取B部分作为研究对象，A部分对B部分的作用以力 N' 表示，也可以得出相同的結果。

以上求内力的方法称为截面法，它的步骤可归纳为：

- (1) 假想地将杆件沿所研究的截面切成两部分；
- (2) 丢掉一部分，留下另一部分作为研究对象；
- (3) 把丢掉部分对留下部分的作用以力表示，从而将内力暴露出来。
- (4) 研究留下部分的平衡，求出内力。

例 1-1 求图 1-3a 所示吊钩夹板 1-1，2-2 截面的内力。

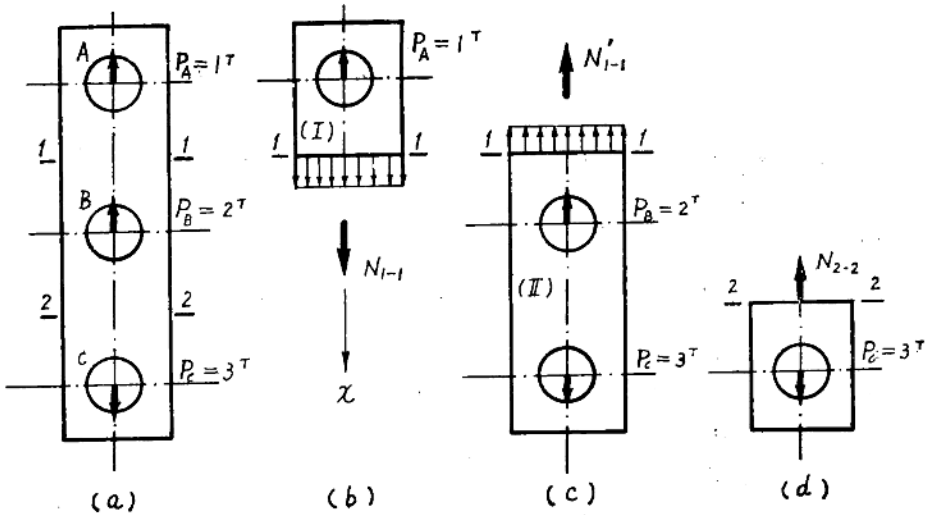


图 1-3

解：

假想地在 1-1 截面处将杆件分成 I、II 两部分，用力表示一部分对另一部分的作用，如图 1-3b 和图 1-3c 所示；取 I 部分为脱离体并考虑其平衡，由

$$\Sigma x = 0 \quad P_A - N_{1-1} = 0$$

$$\therefore N_{1-1} = P_A = 1t$$

如果取II部分为脱离体(图1-3c)考虑其平衡,也可以得到相同的结果:

$$\Sigma x = 0 \quad N'_{1-1} + P_B - P_C = 0$$

$$\therefore N'_{1-1} = P_C - P_B = 3 - 2 = 1t$$

N_{1-1} 和 N'_{1-1} 是I部分和II部分之间的相互作用力,根据作用与反作用原理,它们是等值而反向的。

用同样的方法,将杆件从2-2截面假想切开,考虑下部分的平衡(图1-3d),可得2-2截面上的轴向力为:

$$N_{2-2} = 3t$$

容易看出夹板从A到B的各个横截面上的轴向力都等于 $N_{1-1} = 1t$,从B到C各个横截面的轴向力都等于 $N_{2-2} = 3t$ 。

求出了受拉杆件各横截面上的内力,强度问题解决了没有呢?还没有。例如,我们做两根铸铁杆件的抗拉实验,其中一根的横截面积为另一根的二倍。实验的结果告诉我们:当拉力 P 增大到一定数值 P^0 时,此时,虽然两根杆件横截面上的内力是相等的,但是横截面积较小的杆件已经断裂,而横截面积较大的杆件却仍很安全。由此可知,光知道横截面受到多大的内力还不能确定构件是否破坏,还必须考虑杆件横截面积的大小。因为横截面积小的杆件单位面积上所受的内力大,容易使杆件破坏。横截面积大的杆件,单位面积上所受的内力小,杆件比较安全。所以单位面积上内力的大小才是决定杆件是否破坏的因素。单位面积上的内力叫做应力,单位是公斤/厘米²(kg/cm²)或公斤/毫米²(kg/mm²)

显然,如果内力在截面上均匀分布,则截面上各点的应力相等;如果内力在截面上非均匀分布,则截面上各点的应力不相等。因此,研究构件的强度,在求出内力后,还要找出它在截面上的分布规律,并由此确定截面上应力最大的点。

受拉杆件横截面上的内力是怎样分布的呢?内力的分布规律是看不见也摸不着的,要解决这个问题必须按照毛主席的教导:“研究问题要从人们看得见摸得到的现象出发来研究藏在现象后面的本质,从而揭发客观事物的本质的矛盾。”内力怎么分布虽然看不到,但是变形可以看得见,而变形和内力之间又有一定的关系,由实验得知,当受力不超过一定的范围,力大变形也大,力小变形也小,力与变形成正比关系。所以,为了找到内力在横截面上的分布规律,先从研究杆件的变形开始。

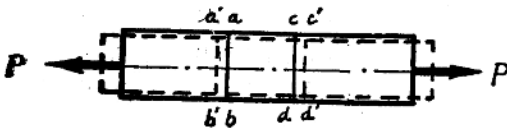


图 1-4

取一等截面直杆(图1-4),为了观察它在受拉伸时的变形现象,先在杆件表面画两条垂直于杆轴线的直线 ab 和 cd ,然后沿杆的轴线施加拉力 P ,杆件发生变形(图1-4的虚线),可以看到:

平行直线 ab 和 cd 仍然是垂直于杆轴的直线,只是它们之间的距离增大了(见图1-4的 $a'b'$ 和 $c'd'$)。

由实验观察到的变形现象,这是认识的感觉阶段,然后将我们感觉到的东西加以整理改造,由表及里,由此及彼地进行判断推理;设想杆件表面上的直线 ab 和 cd 各代表一个横截面,

那么，根据它们的变形情况，可以假设杆件的横截面拉伸后仍然是垂直于杆轴线的平面，只是它们互相移动了一段距离。这个假设叫做平面假设。设想杆件是由许多纵向纤维所组成，根据平面假设，任意两横截面之间的纵向纤维的伸长变形是相同的。再根据力与变形成正比的关系，就可以推知横截面上内力是均匀分布的，即横截面上各处的应力相等，其方向垂直于横截面。这种垂直于横截面的应力叫做正应力。以 σ 表示。设杆件横截面的面积为 F ，而横截面上的内力为 N ，则正应力为

$$\sigma = \frac{N}{F} \quad (1-1)$$

公式(1-1)同样可用于杆件受压缩的情况，为区别起见，规定拉伸时的应力为正，压缩时的应力为负。

§ 1-3 拉伸和压缩的强度条件

由公式(1-1)求得的是杆件因外力作用而产生的应力，即杆件工作时实际产生的应力，所以称为工作应力。工作应力是随外力和截面面积的大小而变化的，这是影响杆件强度的因素的一个方面；至于杆件在工作应力作用下是否破坏，主要还是决定于杆件是用什么材料制成，它所能承受的应力的极限值是多少。材料的极限应力是影响杆件强度的另一方面的因素。

怎样确定材料的极限应力呢？这要通过材料试验来测定。例如用等截面直杆做拉伸试验，当拉力增大到 P^0 时发生断裂，若杆件横截面积为 F ，则应力为 $\sigma^0 = \frac{P^0}{F}$ ，这应力就是极限应力（关于这一问题将在下节详细讨论）。

为了保证杆件安全正常地工作，工作应力必须小于材料的极限应力，我们把构件安全正常工作所许产生的最大应力叫做许用应力，以 $[\sigma]$ 表示，显然许用应力 $[\sigma]$ 必须低于极限应力。关于许用应力的确定方法，将在后面讨论。

杆件拉伸和压缩时，安全正常工作的条件应是保证最大工作应力不超过材料的许用应力。即

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{F} \leq [\sigma] \quad (1-2)$$

上式称为杆件在拉伸和压缩时的强度条件。满足上述条件，则认为杆件具有足够的强度。不过，实用时要注意，若 $\sigma_{\max} < [\sigma]$ ，则杆件是安全的，但二者相差太大，则不经济；又若 $\sigma_{\max} > [\sigma]$ ，但二者相差不超过5%，而改变原设计又不很方便，则仍可用原设计的结果。

例1-2 吊钩夹板的尺寸和受力情况如图1-5a所示，见例(1-1)。夹板由A3号钢制成，许用应力 $[\sigma] = 1000 \text{ kg/cm}^2$ 。试校核其强度。

解：根据例1-1的计算结果得知夹板AB段各截面的轴向力为 $N_{1-1} = 1 \text{ t}$ ，BC段各截面的轴向力为 $N_{2-2} = 3 \text{ t}$ 。如果以平行于杆轴线的坐标表示杆件横截面的位置，垂直于杆轴线的坐标表示轴向力。则可画出轴向力沿杆轴线变化的图形如图1-5b所示。这种图形叫做轴向力图。

由轴向力图可看出BC段所受的內力最大，即 $N_{\max} = 3 \text{ t}$ ，而在该段内又以被中间孔削弱

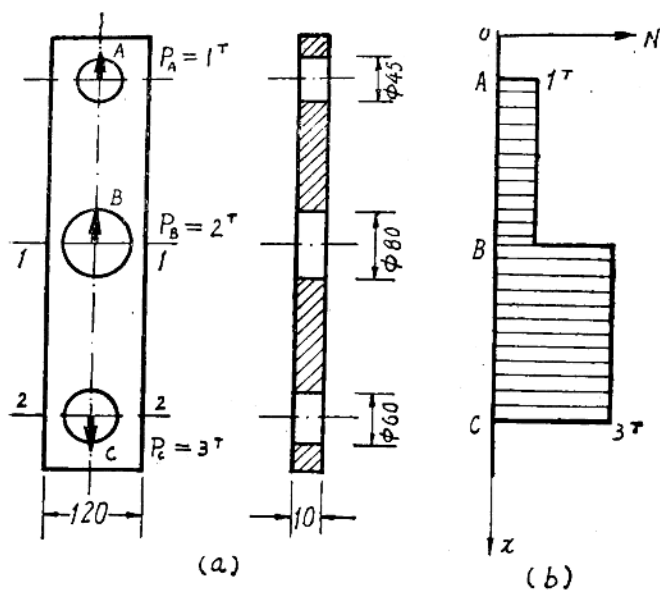


图 1—5

最严重的 1—1 截面面积最小, $F_{min} = (12-8) \times 1 = 4\text{cm}^2$, 所以 1—1 截面是夹板最危险的截面, 简称危险截面。该截面上的工作应力最大, 如果该截面强度足够, 则整个夹板就具有足够的强度。

1—1 截面的工作应力为

$$\sigma_{max} = \frac{N_{1-1}}{F_{1-1}} = \frac{N_{max}}{F_{min}} = \frac{3000}{4} = 750\text{kg/cm}^2$$

根据强度条件, 将此应力与许用应力比较 $\sigma_{max} = 750\text{kg/cm}^2 < [\sigma] = 1000\text{kg/cm}^2$, 所以夹板强度足够。

§ 1—4 拉伸和压缩时材料的机械性质

杆件受拉伸(或压缩)后产生变形, 杆件内部则产生内力以抵抗变形, 当载荷增大到一定数值, 杆件发生破坏。杆件从开始受载荷直到破坏的整个过程中所表现出的载荷(外力)与内力(抗力)发展规律的特性, 即材料抵抗破坏和抵抗变形的能力称为材料的机械性质, 这些性质有强度、弹性、塑性等, 它们是研究强度和刚度问题的基础。

怎样确定材料的机械性质呢? “认识来源于实践”。要确定材料的机械性质必须进行材料试验。测定材料机械性质的试验有拉伸、压缩、剪切、扭转、弯曲、硬度、冲击、疲劳等。本节我们主要是研究静力拉伸试验, 所谓静力试验, 是指试验时载荷是连续而缓慢地增加的。静力拉伸试验能确定材料许多重要的机械性质, 并且由它们可以粗略地估计出材料在其他试验所表现出的机械性质。所以静力拉伸试验用得比较广泛。

(一) 低碳钢的拉伸试验

试验前按国家标准 GB700—65 将材料制成标准试件(图 1—6), 图中 l_0 为试件的计算长度。

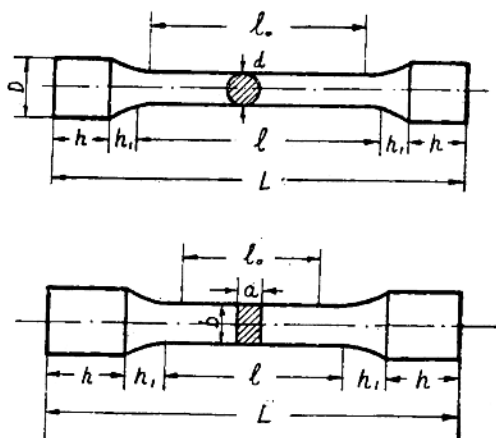


图 1—6

园形試件， $l_0 = 10d$ 时称为长試件； $l_0 = 5d$ 时称为短試件。

矩形截面試件 $l_0 = 11.3\sqrt{F}$ 时称为长試件； $l_0 = 5.65\sqrt{F}$ 时称为短試件。

試驗所需設備及其方法步驟在实验讲义中已有說明，这里只介紹試驗过程中的現象和結果。

試驗时将試件安装在試驗机的夾头內，然后加载，試件受力后就发生变形，受力增大，变形也随着增大，依次記下载荷 P 和与之对应的伸长变形 Δl ，直到試件断裂为止，将所得結果記錄在以 P 为縱坐标，以 Δl 为横坐标的坐标系上，則可得出一条表示 P 和 Δl 关系的曲綫（图 1—7），这曲綫叫做**低碳鋼的拉伸图**。拉伸图也可用試驗机的自动繪图設備記錄下来。图中 A、B、C、D、E 是拉伸图上的一些特征点，而 P_p 、 P_s 和 P_b 是与之相应的載荷。

拉伸图是观察拉伸試驗所得出的結果，是从試驗的現象得到的认识，要进一步认识材料的性质还必须对試驗結果进行分析研究，加以去粗取精、去伪存真，由此及彼，由表及里的改造制作功夫，才能了解材料的本质。

显然，拉伸图是和試件的尺寸有关的，用低碳鋼制成不同直径和不同长度的試件进行試驗，直径大的試件破坏前所受的最大拉力 P_b 也大，直径小的最大拉力 P_b 也小，能不能讲直径大的試件的材料性质比直径小的試件的材料性质好

呢？不能，因为它们材料是相同的。同样，长試件的伸长变形大，短試件的伸长变形小，也不能因此說长試件的材料性质差。所以，要正确地认识材料的机械性质，就应当設法消除試件尺寸的影响。为此，我们把拉伸图的縱坐标 P 除以試件的原横截面面积 F ，将它轉化为 $\sigma = \frac{P}{F}$ 的应力坐标；横坐标 Δl 除以試件的計算长度 l_0 ，它将轉化为 $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ 的应变坐标（应变即单位长度的伸长变形，又称为相对伸长。）經過这一改造制作，拉伸图 ($P-\Delta l$ 图) 就轉化成为应力—应变图 ($\sigma-\epsilon$ 图)，如图 1—8 所示。

应力—应变图显示了材料拉伸时載荷与抗力的变化規律，由此可以测定材料許多重要的机械性质，现分别进行分析研究。

1. **弹性阶段** 从試件开始受力，（即从 0 点）到 A 点的 OA 段是一条直綫，在这一阶段內应力 σ 和应变 ϵ 成正比。即

$$\frac{\sigma}{\epsilon} = \text{常数}$$

若用 E 表示比例常数，則有：

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (1-3)$$

若以 $\sigma = \frac{P}{F}$ ， $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ 代入上式，則得：

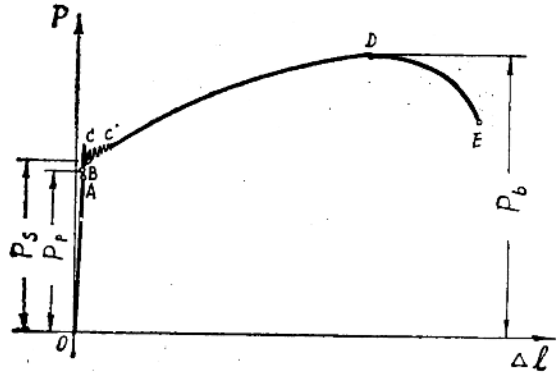


图 1—7

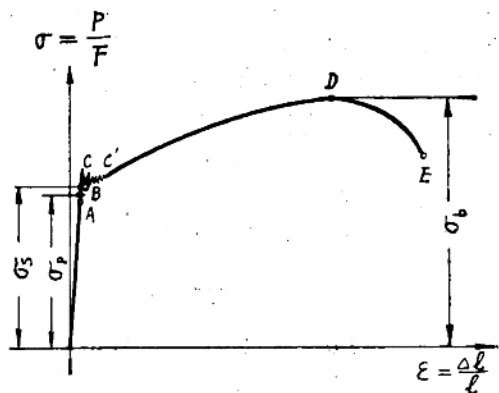


图 1—8

$$\Delta l = \frac{Pl}{EF}$$

(1-4)

(1-3)和(1-4)式表明了材料在oA阶段受力与变形的关系,叫做虎克定律。式中比例常数E叫做材料拉伸(或压缩)时的弹性系数,其单位是公斤/厘米²(kg/cm²),由公式(1-4)可以看出,EF越大,则试件的伸长Δl/越小,EF表明了杆件的抗拉(压)变形的能力,我们把它叫做抗拉刚度。

与A点相对应的应力是应力与应变成正比时的最大应力,叫做比例极限,以σ_p表示。

过A点以后,应力和应变已不成正比关系,但在OB阶段内,当载荷去掉后,试件的变形消失,恢复到原来长度。材料的这种性质叫做弹性。载荷去掉后,即随之消失的变形称为弹性变形。所以OB阶段叫做弹性阶段。过B点后,即使载荷全部去掉,变形也不会完全消失,所以与B点相应的应力又叫做弹性极限,以σ_e表示。

严格地说,虎克定律只在OA阶段成立,过A点以后应力与应变已不成比例,不过实际上A, B两点非常接近,一般把它们当成是重合的。

弹性阶段内,在纵向伸长的同时,横向尺寸将缩短,若变形前的直径为d,变形后直径缩短了Δd,则横向应变(或横向相对变形)ε' = $\frac{\Delta d}{d}$,实验结果证明,横向应变ε'与纵向应变ε之比为一常数,即:

$$\left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right| = \mu \quad (1-5)$$

表1-1

材料名称	E (kg/cm ²)	μ
玻 璃	0.56 × 10 ⁶	0.25
橡 胶	80	0.47
灰口、白口铸铁	(1.15~1.60) × 10 ⁶	0.23~0.27
碳 钢	(2.0~2.1) × 10 ⁶	0.24~0.28
镍铬钢、合金钢	2.1 × 10 ⁶	0.25~0.30
轧制纯钢	1.1 × 10 ⁶	0.31~0.34
轧制磷青铜	1.15 × 10 ⁶	0.32~0.35
冷拔黄铜	(0.91~0.99) × 10 ⁶	0.32~0.42
轧制铍青铜	1.1 × 10 ⁶	0.35
轧制铝	0.69 × 10 ⁶	0.32~0.36
轧制锌	0.84 × 10 ⁶	0.27
铅	0.17 × 10 ⁶	0.42

μ 称为横向变形系数或称泊松比，它和E一样也是一个表示材料弹性性质的系数。表1—1中列出了一些常用材料的E和 μ 值。

2. 屈服阶段 (流动阶段)

应力到达c点后有微小的波动，如果略去这微小的波动不计，则在应力—应变图上cc'成为一水平线段，说明在这一阶段内应力不变而变形却在不断增加，似乎材料失去了对变形的抗力，而发生流动。所以这一阶段叫做屈服阶段(或流动阶段)，产生屈服现象时的最小应力(即载荷第一次下降时的最小值，除以试件原面积所得的应力)叫做屈服极限或流动极限，以 σ_s 表示。

3. 强化阶段

经过屈服阶段后，材料又恢复了对变形的抗力，应力—应变关系形成一段上升的曲线，这个阶段称为强化阶段。

强化阶段的最高点D处的应力称为强度极限，用 σ_b 表示。强度极限是试件承受的最大的应力。

在屈服阶段和强化阶段中试件的变形比弹性阶段大得多，而且当去掉外力后，变形不能全部恢复。这种不能恢复的变形称为残余变形或塑性变形。

试件受力超过屈服极限后，到达f点如随即开始卸载，卸载路线是一条与OE近乎平行的直线fo₁(图1—9)，载荷全部卸掉后，变形不能全部恢复，而留下了oo₁代表的塑性变形，而o₁o₂为弹性变形，如立即重新加载，则应力—应变图如曲线o₁f'de所示(图1—9)其中o₁f'与o₁f近乎重合。f'de曲线部分与不卸载时的拉伸图的fde重合。将卸载后再重新加载的应力—应变图与不卸载的应力—应变图比较，我们发现前者的比例极限和屈服极限提高了，而断裂时的塑性变形形则减小了(由OO₃减小为O₁O₃)。我们把这种先加载，使应力超过屈服极限，然后卸载所引起的比例极限和屈服极限的升高和断裂后塑性变形减小的现象叫做冷作硬化。如果卸载后，给试件以相当时间的“休息”后，再重新加载，则所得的应力—应变图可以使屈服极限提得更高一些，(但强度极限仍旧不变)如图1—9中虚线所示。

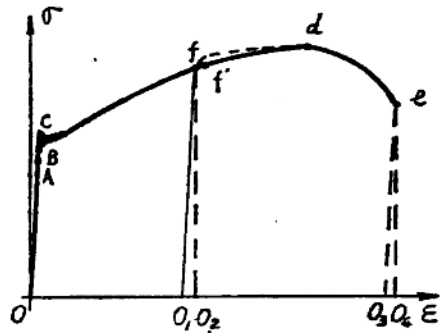


图 1—9

工程实际中，冷作硬化有时是有害的，例如在钢板上冲孔的时候，孔的边缘就会因为冷作硬化的原因而变脆，为了消除这种现象须用钻孔的方法以扩大孔径，除去受冷作硬化部分的材料，或者经过退火以恢复材料原来的塑性性质。但是有些工程结构可以利用冷作硬化以提高材料的强度，例如起重机的钢丝绳和链条，为了提高其强度，减小工作时的塑性变形，制造过程中常将材料进行冷拉；设计钢筋混凝土结构时，使钢筋经过抽拉、辗轧等冷作过程，可以提高它们的屈服极限，减小截面尺寸，节约钢材。

4. 颈缩阶段

应力达到强度极限后，在试件的某一局部区域截面将显著地缩小，形成“颈缩”现象（图 1—10），“颈缩”形成时，塑性变形很快增加，因为颈缩处截面迅速减小，载荷随着下降，直到试件拉断，如应力—应变图上的 E 点。



试件断裂后，将它拼起来，可以测量出断裂后计算长度内的长度 l_1 和断裂处的横截面积 F_1 ，从而可以算出下列比率

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-6)$$

$$\psi = \frac{F - F_1}{F} \times 100\% \quad (1-7)$$

图 1—10

其中 δ 称为延伸率（或伸长率）， ψ 称为截面收缩率。

屈服极限 σ_s ，强度极限 σ_b 是说明材料强度的两个重要指标，延伸率 δ ，截面收缩率 ψ 是说明材料塑性的指标。通常把 $\delta > 5\%$ 的材料叫做塑性材料， $\delta < 5\%$ 的材料叫做脆性材料。

低碳钢（A3 钢）的强度和塑性指标的平均值约为：

$$\sigma_s = 2400 \text{ kg/cm}^2, \quad \sigma_b = 4000 \text{ kg/cm}^2,$$

$$\delta = 20 \sim 30\%, \quad \psi = 60\% \text{ 左右。}$$

对于其他塑性材料，例如中碳钢，合金钢等，它们的拉伸图和低碳钢的大致相似，不过有些材料例如镍铬钢流动现象不明显，对于这些材料通常规定相对塑性变形达到 0.2% 时的应力作为屈服极限，并以 $\sigma_{0.2}$ 表示。

造船和机械工程中最常使用的是黑色金属材料，如钢铁，以及各种有色金属，如铜、铝等。在钢铁中，除一般碳钢外，近几年来我国遵照毛主席“独立自主，自力更生”的教导生产

了许多优质钢材，特别是结合我国的实际情况，充分利用我国的合金资源建立了具有独特风格的普通低合金钢体系。普通低合金钢是一种含有少量（ $\leq 3\%$ ）合金元素的普通合金钢，它的强度较高，综合性能好，具有耐磨、耐腐蚀，耐中温，耐低温以及加工工艺性能好等特点，而成本与碳素钢相近。因此在建造万吨海轮，如“东风号”，南京长江大桥，解放牌汽车大梁都广泛采用 16 锰、15 锰钛等普通低合金钢；既减轻了结构物的重量，提高了使用寿命，又降低了材料成本。

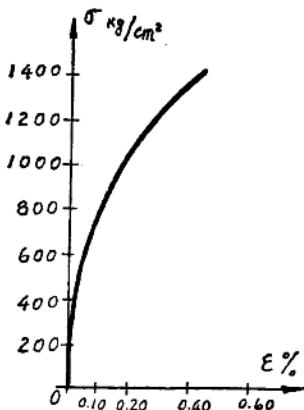


图 1—11

（二）铸铁的拉伸试验

用灰口铸铁做拉伸试验可以得出图 1—11 所示的应力—应变图。它没有明显的直线部分。也没有流动现象，从开始拉伸到断裂，试件的变形很小，几乎难以测量得到，所以铸铁是脆性材料。从图中还可以看出它的强度极限 σ_b 较低，说明脆性材料的抗拉能力较差。

(三) 壓縮試驗

金属材料做壓縮試驗时，試件一般做成圓柱体，高度 h 和直径 d 之比是 $1 \sim 3$ ，試件不能太高，否則容易压弯。

低碳鋼和灰口鑄鐵縮时的应力—应变图如图1—12和图1—13中的实线所示。图中虚线表示低碳鋼和鑄鐵拉伸試驗的結果。通过比較可以看出：

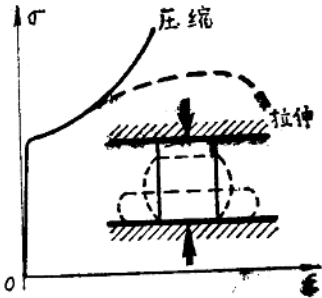


图 1—12

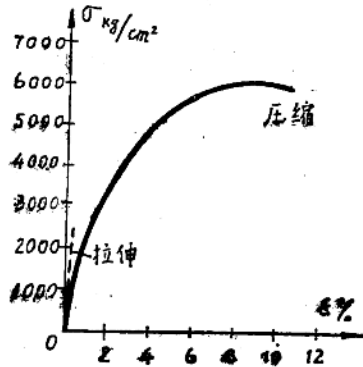


图 1—13

低碳鋼的应力未超过屈服极限前，拉伸和压缩时的应力—应变图基本相同，以所，对低碳鋼來說，压缩和拉伸时的弹性系数 (E 和 μ)、比例极限 σ_p 、流动极限 σ_s 等机械性质是相同的。应力超过屈服极限后，压缩时的应力—应变曲线不断上升，試件先变成鼓形，后又变成薄餅形。强度极限无法测定。

鑄鐵压缩时和拉伸时一样也沒有流动现象，載荷到一定数值时即沿与軸綫約成 45° 的斜截面破裂 (图1—14)。鑄鐵压缩时的强度极限比拉伸时大得多 (約四倍)，說明它的抗压能力較好，所以一般多用作受压构件。



图 1—14

下頁附表給出工程上常用材料的机械性质的指标，供使用时参考。其他材料的机械性质可由《机械設計手册》或其他設計手册中查得。

(四) 塑性材料和脆性材料的比较

从材料实验的結果可知材料可分为塑性材料和脆性材料两类。下面将这两类材料的机械性质进行一些简单的分析和比較。

1. 脆性材料受力时变形很小就破坏，而塑性材料破坏时有显著的塑性变形；
2. 脆性材料的抗拉能力远較塑性材料为低，所以，它的应用范围受到一定的限制；
3. 脆性材料与塑性材料的区别，还表现在它们对局部应力或应力集中的反应不同。

几种常用优质碳素结构钢的机械性质

钢号	屈服极限 σ_s (kg/mm ²)	强度极限 σ_b (kg/mm ²)	延伸率 δ_5 (%)	收缩率 ψ (%)	冲击韧性 a_k (kg-cm/cm ²)	布氏硬度	
						热轧	退火
20 [#]	25	42	25	55	/	156	/
30 [#]	30	50	21	50	8	179	/
45 [#]	36	61	16	40	5	241	197

16Mn 鋼机械性质

板厚 (mm)	屈服极限 σ_s (kg/mm ²)	强度极限 σ_b (kg/mm ²)	延伸率 δ_5 (%)	a_k (不小于) (kg-M/cm ²) 冷弯			
				常温	-10°C	时效	180°
≤16	≥35	≥52	≥21	6	3	3	$\delta=2a$
17~25	≥33	≥50	≥19	6	3	3	$\delta=3a$
26~38	≥31	≥48	≥19	6	3	3	$\delta=3a$
38~50	≥29	≥48	≥19	6	3	3	$\delta=3a$
50~100	≥28	≥48	≥19	6	3	3	$\delta=3a$

球墨铸铁件的机械性能 (标准牌号JB298-62)

牌 号	屈服极限 σ_s (kg/mm ²)	强度极限 σ_b (kg/mm ²)	延伸率 δ_5 %	冲击韧性 a_k (kg-M/cm ²)	布氏硬度 H_B	特 性
QT-45-0	36	45	/	/	181-255	具有較高的强度和硬度, 但塑性較低
QT 50-13	38	50	1.5	1.5	181-255	
QT 60-2	42	60	2	1.5	197-269	
QT 45-5	33	45	5	2	170-207	具有較高的塑性和强度, 但硬度較低
QT 40-10	30	40	10	3	156-197	