高等学校试用教材

建筑力学 第二分册

材料力学

哈尔滨建筑工程学院
重庆建筑工程学院 编

人民教育出版社

高等学校试用教材

建筑力学第二分册

材料力学

哈尔滨建筑工程学院
重庆建筑工程学院 编

人民教育出版社

内容提要

这套书是根据一九七七年十一月教育部委托召开的高等学校工科基础课力学教材会议讨论的《建筑力学》教材编写大纲编写的，适用于土建类建筑学、给水排水、采暖通风、建筑材料等专业。全书共分三个分册：第一分册为理论力学，第二分册为材料力学，第三分册为结构力学。

本书是《建筑力学》的第二分册——材料力学，本书突出了基本内容，对非基本内容作了较多的删减。主要内容包括绪论，轴向拉伸和压缩，剪切和联结的实用计算，扭转，梁的内力，截面的几何性质，梁的应力及强度计算，梁的变形，应力状态和强度理论，杆件在组合变形时的强度计算，压杆的稳定，动荷载等。

本书除供上述专业作为试用教材外，也可供其他专业或有关工程技术人员参考。

高等学校试用教材
建筑力学第二分册
材　料　力　学
哈尔滨建筑工程学院
重庆建筑工程学院　编
*
人民教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
人民教育出版社印刷厂印装
*
开本 787×1092 1/16　印张 12　字数 129,000
1979 年 7 月第 1 版　1980 年 2 月第 1 次印刷
印数 00,001—8,700
书号 15012·0177　定价 1.00 元

编 者 的 话

根据一九七七年十一月教育部委托召开的高等学校工科基础课力学教材会议讨论的《建筑力学》教材编写大纲，湖南大学、哈尔滨建筑工程学院、重庆建筑工程学院三院校为土建类的建筑学、给水排水、采暖通风、建筑材料等专业编写了这套中学时的《建筑力学》教材。全书共分三个分册：第一分册为理论力学，第二分册为材料力学，第三分册为结构力学。为了便于选用，在编写时我们既注意了这三部分内容的相互联系和配合，又保持了各自相对的独立性和理论的系统性。

本书是《建筑力学》的第二分册——材料力学。在编写过程中，注意贯彻辩证唯物主义观点和理论联系实际的原则，力求做到内容精简，由浅入深，叙述上便于自学。为了既保持理论的系统性和完整性，又使学生在不多的学时内能很好地掌握基本概念、基本理论和基本方法，本教材突出了基本内容，对非基本内容作了较多的删减。

讲授本教材的内容约需70—80学时(不包括实验)。

本书由天津大学、北京工业大学和同济大学主审，参加审稿会的还有西安冶金建筑工程学院、武汉建筑材料工业学院等院校。

参加本书编写工作的有：哈尔滨建筑工程学院干光瑜(第二、三、八章)，秦惠民(绪论及第四、五、六、七章)，汪成杰(第九章)，重庆建筑工程学院肖明心(第一、十、十一章)。由于编者水平所限，缺点和错误必定不少，希望使用本书的同志批评指正。

编者

一九七九年七月

目　录

绪　论

§绪-1　材料力学的任务

任何结构物或机械都是由构件组成的。

结构物或机械在正常工作的情况下，组成它们的各个构件一般都承受一定的力。例如，房屋中的梁要承受楼板传给它的重量，机器中的螺钉当其拧紧后要受力。这些重量和力统称为加在构件上的荷载。

要想使结构物或机械能正常地工作，就必须保证组成它们的每个构件在荷载作用下能安全地正常工作。因此，工程上对所设计的构件，在力学上有一定的要求。

1. 强度要求

所谓强度，是指材料或构件抵抗破坏的能力。强度有高低之分，在一定荷载的作用下，说某种材料的强度高，是指这种材料比较坚固，不易破坏。说某种材料的强度低，是指这种材料不坚固，易于破坏。在同样的荷载作用下，钢比木材的强度高。

任何构件都不允许在正常工作情况下破坏，这就要求构件必须具有足够的强度。例如，作用在梁或轴上的荷载过大时，梁或轴就可能断裂，显然，这是绝不允许的。

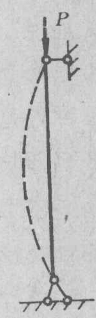
2. 刚度要求

所谓刚度，是指构件抵抗变形的能力。刚度有大小之分。说某个构件的刚度大，是指这个构件在荷载作用下，不易变形，即抵抗变形的能力强；说某个构件的刚度小，是指这个构件在荷载作用下，易于变形，即抵抗变形的能力低。材料相同、长度相同而粗细不同的两根杆，在相同荷载作用下，细杆比粗杆容易变形，即细杆的刚度比粗杆的刚度要小。

任何物体在外力作用下，都或大或小地产生变形。在工程上，对一构件来说，只满足强度要求是不够的，如果变形过大，也会影响其正常使用。例如，楼板梁在荷载作用下产生的变形太大时，下面的抹灰层就会开裂、脱落；屋面上的檩条变形太大时，就会引起屋面漏水；机床上的轴在正常工作情况下变形过大时，将影响机床的加工精度等等。因此，在工程中，根据不同的工程用途，对某些构件的变形给以一定的限制，使构件在荷载作用下产生的变形不能超过一定的范围，这就要求构件具有一定的刚度。

3. 稳定性要求

有些构件在荷载作用下，其原有形状的平衡可能丧失“稳定性”。例如受压的细长直杆(图绪-1)，当压力不太大时，杆可以保持原来直线形状的平衡。当压力增加到超过一定的限度时，杆就不能继续保持直线形状，而突然从原来的直线形状变成弯曲形状，这种现象称为丧失稳定或简称失稳。稳定性要求就是要求这类受压构件不能丧失稳定。



图绪-1

由于构件失稳后将丧失继续承受荷载的能力，所以，其后果往往是很严重的。

例如，房屋中承重的柱子如果过细、过高，就可能由于柱子的失稳而导致整个房屋的倒塌。因此，细长的受压构件，必须保证有足够的稳定性。

满足了上述各项要求，才能保证构件安全地正常工作。

构件的强度、刚度、稳定性就是材料力学所要研究的主要内容。

两个尺寸相同、荷载相同而材料不同的构件，它们产生变形的大小和破坏的难易是不同的。例如，尺寸与荷载均相同的木杆与钢杆相比，木杆就容易变形，也容易破坏。这说明构件的强度、刚度、稳定性是与所用材料的力学性质有关。因此，材料力学还要研究材料在荷载作用下表现的力学性质。

材料的力学性质需通过试验来测定。工程中还有些单靠理论分析解决不了的问题，也需借助于实验来解决。因此，在材料力学中，实验研究与理论分析同等重要，都是完成材料力学任务所必须的手段。

综上可知，材料力学研究的对象是构件，研究的主要内容是构件的强度、刚度、稳定性以及材料的力学性质；在材料力学的研究中，既包括理论分析又包括实验。通过材料力学的研究，将为工程中设计安全可靠的构件提供理论基础。

对工程技术人员来说，设计构件时，既要保证构件能安全地正常工作，还应使设计的构件能很好地发挥材料的潜力，以减少材料的消耗。因此，工程技术人员必须掌握一定的力学知识，在设计时运用这些知识去合理地选用材料、选择截面尺寸，使设计的构件既安全可靠又经济合理。

§绪-2　关于变形固体的概念

在理论力学的静力学中，讨论力系作用下的固体(物体)平衡时，是把固体看成刚体，即不考虑固体形状和尺寸的改变。实际上，自然界中的任何固体在外力作用下，都要或大或小地产生变形，也就是它的形状和尺寸总会有些改变。固体产生的变形，有些可直接观察到，有些变形则需通过仪器才能测出。

由于固体具有可变形性质，所以又称为变形固体。严格地讲，自然界中的一切固体均属变形固体。

材料力学是研究构件的强度、刚度、稳定等方面问题的，这些问题的研究，都需与构件在荷载作用下产生的变形相联系，因此，固体的可变形性质就成为其重要的基本性质之一而不容忽略。也就是说，在材料力学中，研究对象不能再看成是刚体，必须看成为可变形的固体。

变形固体在外力作用下产生的变形，就其变形性质，可分为弹性变形与塑性变形。

弹性是指变形固体当外力去掉后能恢复原来形状和尺寸的性质。例如，一个弹簧在拉力作用下要伸长，当拉力不太大时，去掉拉力后，它仍能恢复原状，这表明弹簧具有弹性。弹性变形是指变形体上的外力去掉后可消失的变形。如果去掉外力后，变形不能全部消失而留有残余，此残余部分就称为塑性变形，也叫做残余变形。

去掉外力后能完全恢复原状的物体称为完全弹性体或理想弹性体；不能完全恢复原状的物体称为部分弹性体。部分弹性体在外力作用下产生的变形由两部分组成，一部分为弹性变形，另

一部分为塑性变形。

实际上，自然界中并不存在完全弹性体，一般变形固体既具有弹性，也具有塑性。由实验得知：常用的工程材料如金属、木材等，当外力不超过某一限度时，很接近于完全弹性体，这时可以把它们看成为完全弹性体(称弹性阶段)；如果外力超过了这一限度，就要产生明显的塑性变形而成为部分弹性体(称为弹塑性阶段)。

本书要讨论的问题，将限于弹性阶段，即把研究对象——构件看成为完全弹性体。

工程中大多数的构件，在荷载作用下产生的变形，与构件本身的尺寸相比，常是很微小的，我们称这种变形为“小变形”。与此相反，有些构件在荷载作用下可能产生很大的变形，这类变形称为“大变形”。我们所研究的内容，只限于小变形范围。由于变形很微小，我们在研究构件的平衡、运动等问题时，就可采用构件变形前的原始尺寸进行计算；在计算中，变形的高次方项也可忽略不计。

§绪-3 材料力学采用的基本假设

自然界中的物体，其性质是多种多样十分复杂的。每门科学只是从某个角度去研究物体性质的某一方面。在研究中，常把对问题影响不大的一些次要性质加以忽略，而只保留其主要性质，这样就可以将复杂的真实物体看成为只具有某种主要性质的理想物体。经过这样的抽象简化，将使研究工作大为简便。在材料力学的研究中，对变形固体作了如下的基本假设：

1. 连续、均匀假设

连续是指材料内部没有空隙，均匀是指材料的性质各处都一样。连续、均匀假设即认为物体在其整个体积内毫无空隙地充满了物质，且物体的性质各处都一样。

实践证明，在工程中将构件抽象为连续、均匀的变形体，所得到的计算结果是令人满意的。

由于采用了连续、均匀假设，我们就可以从物体中截取任意微小部分进行研究，并将其结果推广到整个物体；同时，也可以将那些用大尺寸试件在实验中获得的材料性质，用到任何微小部分上去。

2. 各向同性假设

即认为材料沿不同方向具有相同的力学性质。常用的工程材料如钢、塑料、玻璃以及浇注得很好的混凝土等，都可认为是各向同性材料。如果材料沿不同方向具有不同的力学性质，则称为各向异性材料。我们在材料力学中所研究的，主要限于各向同性材料。

3. 弹性假设

即当作用于物体上的外力不超过某一限度时，可将物体看成为完全弹性体。

由于采用了上述假设，大大便利了理论的研究和计算方法的推导。尽管材料力学所得出的计算方法，只具有近似的准确性，但对工程上来说，它的精确程度已满足一般的要求。

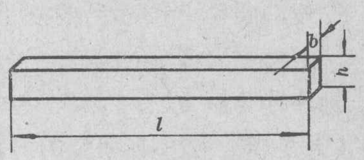
应该指出，实践是检验真理的标准，任何假设都不应该是主观臆想的，它必须建立在实践的基础上。同时，在假设基础上得出的理论结果，也必须经过实践来验证。

综上所述，在材料力学中，是把研究对象——构件视为连续、均匀、各向同性的可变形固体，

所研究的范围，只限于材料处于弹性阶段，且构件的变形是微小的。

§绪-4 构件变形的基本形式

工程上构件的种类很多，如杆件、板、薄壳等，材料力学研究的只是其中的杆件。所谓杆件，是指其长度相对两个横向尺寸大得多的构件。例如，图绪-2所示的梁，其长度 l 远大于横截面的高度 h 和宽度 b，它就是杆件。一般机器上的轴、建筑工程中的梁、柱子等均属杆件。杆件又简称为杆。



图绪-2

就杆件外形来分，有直杆、曲杆和折杆。杆件的轴线是直线的为直杆，轴线是曲线或折线的，分别为曲杆或折杆。就横截面（垂直于轴线的截面）来分，杆件又可分为等截面（各横截面均相同）杆和变截面（横截面是变化的）杆。我们将着重讨论等截面的直杆。

作用在杆件上外力形式的不同，使杆件产生变形的形式也各不相同，但总不外下列几种基本形式：

1. 轴向拉伸或压缩（图绪-3、4） 在一对方向相反、作用线与杆轴线重合的外力作用下，杆件将发生长度的改变（伸长或缩短）。

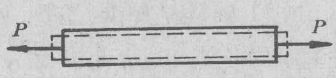
2. 剪切（图绪-5） 在一对相距很近、方向相反的横向外力作用下，杆件的横截面将沿外力作用方向发生错动。

3. 扭转（图绪-6） 在一对方向相反、位于垂直杆轴线的两平面内的力偶作用下，杆的任意两横截面将发生相对转动。

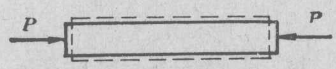
4. 弯曲（图绪-7） 在一对方向相反、位于杆的纵向平面内的力偶作用下，杆将在纵向平面内发生弯曲。

工程实际中的杆件，可能同时承受不同形式的外力，不论其变形情况怎样复杂，其变形均是由上述各种基本变形形式组成。

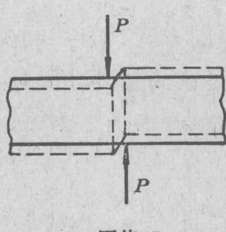
以下各章将就上述各种基本变形形式以及同时存在两种以上基本变形的组合情况，分别加以讨论。



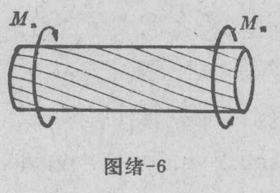
图绪-3



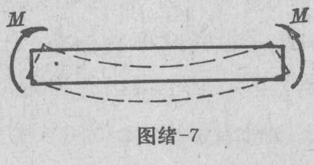
图绪-4



图绪-5



图绪-6



图绪-7

第一章　轴向拉伸和压缩

拉伸和压缩是最简单最基本的变形，拉杆和压杆常见于悬索、柱(关于柱的稳定问题将在第十章讨论)、以及桁架等结构中，所以，无论在理论上或实践上，拉伸和压缩的研究都很重要。

§1-1　轴向拉压杆横截面的内力　轴力图

作用线与杆的轴线重合的外力(或外力系的合力)叫“轴向外力”。如其使杆件伸长(图 1-1a)，则为轴向拉力，简称“拉力”；如其使杆件缩短(图 1-1b)，则为轴向压力，简称“压力”。相应的变形分别叫做“拉伸”和“压缩”。

当我们用手拉长一根橡皮棒，将感到棒内有一种反抗拉长的力。手拉的力(外力)越大，棒被拉伸得越长，这种反抗力也越大。这种反抗力就是橡皮棒的“内力”。这是关于内力的一种感性认识。

现在来研究图 1-2a 所示拉杆某一截面 C 的内力。设想用一平面沿横截面 C 把杆割断，分杆为甲、乙两部分。如无内力，则甲在 A 端轴向外力 P 作用下将与乙分离而左移。但整个杆件及其任一局部都是静平衡的，甲乙并未分离，可见实际上乙必定施加了作用力拉住甲以阻止分离，如图 1-2b 中的连续分布力 N_C 所示，其反作用力 $N_{C'}$ 作用于乙，N_C 和 $N_{C'}$ 就是 C 截面的内力。图 1-2c 所示分布力的合力为 N_C 和 $N_{C'}$，今后说内力都指这种合力。N_C 与 P 构成平衡力系，$N_{C'}$ 与 R 构成平衡力系，它们的作用线与 P 或 R 的作用线即杆的轴线重合，所以称它们为“轴向内力”，简称“轴力”。

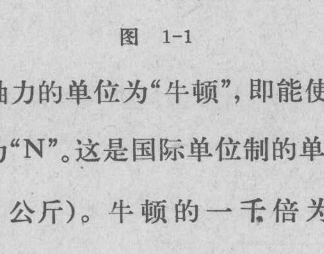


图　1-1

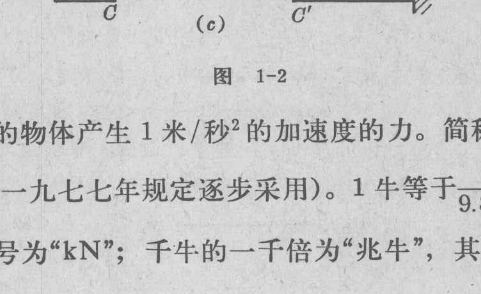


图　1-2

轴力的单位为“牛顿”，即能使质量为 1 千克的物体产生 1 米/秒^2 的加速度的力。简称“牛”，符号为“N”。这是国际单位制的单位(我国国务院一九七七年规定逐步采用)。1 牛等于$\frac{1}{9.81}$公斤(≈0.1 公斤)。牛顿的一千倍为“千牛”，其符号为“kN”；千牛的一千倍为“兆牛”，其符号为“MN”。

当轴力的指向背离截面时(图 1-3a)，截面附近微段的变形是伸长，这种轴力是拉力。当轴

力的指向是向着截面时(图 1-3*b*)，截面附近微段的变形是缩短，这种轴力是压力。为了便于区别轴力伴随的变形，现约定：拉力为正的轴力，压力为负的轴力。

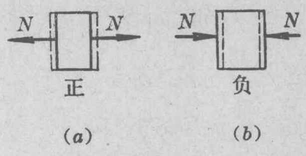


图 1-3

总之，截面的轴力是截面两边的两部分(甲和乙)之间的相互作用力，单位为牛顿，拉力为正，压力为负。

由上面的讨论可以总结出求杆件任一截面的内力的具体方法，即“截面法”，其步骤如下(参阅图 1-2)。

第一步：割断杆件取脱离体。

想象沿要求其内力的截面把杆割断，使它成为互相脱离的两部分。取这两部分中的任一部分(最好取外力较少的那一部分)为脱离体，另一部分弃置不顾(它对脱离体的作用由脱离体上的截面内力代替，见下文)。

第二步：为所取脱离体画受力图。

脱离体受两种力作用：一是原来作用于脱离体上的所有外力。例如，在图 1-2*c* 中若取甲为脱离体，则应将 A 端的外力 P 画上。二是暴露出来的截面上的内力。例如，图 1-2*c* 中的 N_C，这是被弃置的部分乙对脱离体甲的作用力。原来的外力 R 并不在脱离体上，可弃置不顾，其作用已体现于 N_C。

第三步：按脱离体的平衡条件求内力。

例如，在图 1-2*c* 中，以部分甲为脱离体，设以杆的轴线为 x 轴，则由

$$\Sigma X=0,\quad N_C-P=0$$

得

$$N_C=P(\text{拉})$$

第四步：确定内力的正负号，拉力为正，压力为负。

例 1-1 一杆所受外力经简化后其计算简图如图 1-4*a*，试求各段内截面上的轴力。

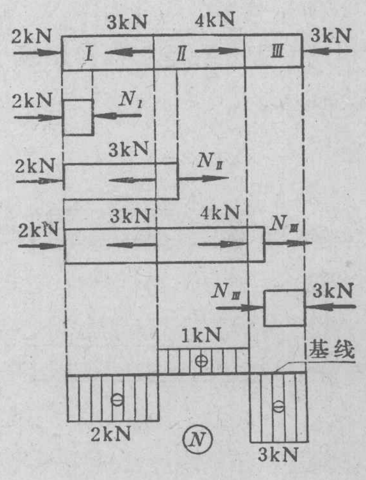


图 1-4

解：在第一段范围内的任一截面处把杆割断，取左边为脱离体如图 1-4*b*，以杆轴为 x 轴，由平衡条件

$$\Sigma X=0,\quad 2-N_I=0$$

得

$$N_I=2\ \text{kN}(-)$$

因一眼即可判定 N_I 应该是压力，故图 *b* 中所绘 N_I 为压力——箭头方向指向截面。但在上式 ($N_I=2$ kN) 中答数之前是正号，不足以说明这 2 kN 是压力，故在答数之后再注一负号，以明确其为压力。

在第二段范围内的任一截面处把杆截断，取左边部分为脱离体如图 *c*，因一眼不能判定 N_{II} 是拉力还是压力，我们先设它为拉力(箭头方向背离截面)，如果计算出 N_{II} 是正的，表明假设得对，N_{II} 就是拉力；如果算出来 N_{II} 是负的，表明假设拉力是不对的，则 N_{II} 是压力。由脱离体(图 *c*)的平衡条件，我们有

$$\Sigma X=0,\qquad 2-3+N_{II}=0$$

得

$$N_{II}=1\ \text{kN}$$

结果是正，说明 N_{II} 是拉力。

在第三段范围内的任一截面处把杆截断，取左边部分为脱离体如图 d，暂设 $N_Ⅲ$ 为拉力，由

$$\Sigma X=0,\quad 2-3+4+N_Ⅲ=0$$

得

$$N_Ⅲ=-3\ \mathrm{kN}$$

答数前的负号表明假设 $N_Ⅲ$ 为拉力不对，所以 $N_Ⅲ$ 是压力。图 d 中的 $N_Ⅲ$ 的指向不符实际，但不必改画。

由上面关于内力 $N_Ⅱ$ 和 $N_Ⅲ$ 的计算可见，当先设未知内力为拉力时，所算得的答数前的正负号完全符合内力的实际正负号，因而不必再在答数之后注正负号。

图 d 中外力太多，如取右边为脱离体如图 e 所示，就比较简捷，可一眼判定 $N_Ⅲ=3\ \mathrm{kN}(-)$。

表明全杆截面内力沿杆长度变化情况的图形叫做“内力图”。对拉压杆，就是“轴力图”。在本例中图 f 就是所计算的杆件的轴力图。绘轴力图时，先作一基线与位置图(图 a)的杆轴平行且等长，基线上每一点都代表相应截面的位置。用与基线正交的短线代表相应截面的轴力。其长短按一定的比例表示轴力的大小，正负代表轴力的性质，拉为正，压为负。内力计算的全部结果都表现在轴力图中。由轴力图可以迅速查明哪个截面轴力最大，其强度最需要校核(详见第三节)，由此可见轴力图的重要。

§1-2 正应力 应力集中的概念

一、正应力

轴力本是截面上的分布力的合力。截面上每单位面积内的分布内力叫做“应力”。与截面正交的应力叫做“正应力”，以符号“σ”表示。

一拉(压)杆，设其截面面积为 A，截面轴力为 N，则截面上的正应力为

$$\sigma=\frac{N}{A} \tag{1-1}$$

正应力的正负号与轴力 N 的一致，拉应力为正，压应力为负。

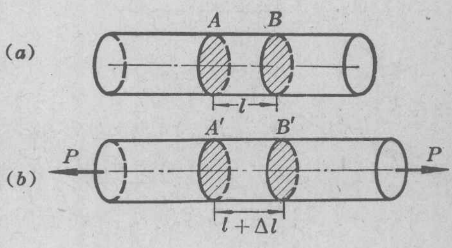


图 1-5

公式(1-1)是以应力在截面上均匀分布为前提的。这个前提的存在，可用简单的实验证实如下：用弹性材料作一圆截面杆如图 1-5。加荷载前在相距为 l 的两横截面的外表皮上画 A 和 B 两圆圈，作为两横截面的周线。加荷载 P 以后，两曲线分别平行移动到 A' 和 B'。根据观察，曲线仍为平面圆曲线，且圆平面仍与杆轴正交。由这客观现象出发，经分析研究，可以提出一个假设：两圆圈 A 和 B 所包含的截面移到 A' 和 B' 后仍为平面，且仍与杆的轴线正交。这就是在轴向拉伸情况下的“平面假设”。所谓平面假设，就是假设变形前原是平面的截面在变形后仍然是平面。按此假设，AB 间一切平行于轴线的纤维(长都是 l)受力后都伸长同样的 Δl(图 1-5b)。则作用于端点的内力应相同，就是说横截面上各点内力相同。所以应力在截面上是均匀分布的。

应力的量纲是[力]/[长]^2，其国际单位制的单位为“帕斯卡”，简称“帕”，符号为“Pa”。

1 帕＝1 牛/米^2 $\qquad$ ($1\ \mathrm{Pa}=1\ \mathrm{N/m^2}$)；

1 千帕＝1 千牛/米^2 $\qquad$ ($1\ \mathrm{kPa}=1\ \mathrm{kN/m^2}$)

工程界过去常用的应力单位是“千克/厘米²”(kg/cm^2)和“千克/毫米²”(kg/mm^2)。

$$1\text{Pa}=\frac{1}{9.81\times10^4}\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\approx1\times10^{-5}\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$1\text{kPa}\approx0.01\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$1\text{kg/cm}^2\approx1\times10^5\text{Pa}=100\text{kPa}$$

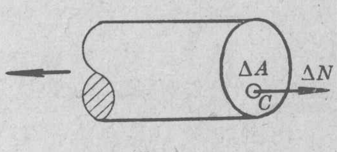


图 1-6

二、截面上一点的正应力　应力集中

今后我们还要处理应力在截面上非均匀分布的各种问题，所以有必要建立关于正应力的精确定义。在截面上某一点C的应力(图 1-6)可以这样来定义：包含C点取一小面积ΔA，设在这ΔA上的分布内力共计为ΔN，则在ΔA范围内的平均正应力为

$$\sigma_{平均}=\frac{\Delta N}{\Delta A}$$

ΔA越小，$\sigma_{平均}$就越能代表C点的应力，当ΔA趋近于零时所得到的$\sigma_{平均}$的极限值就是C点的正应力，即

$$\sigma=\lim_{\Delta A\to0}\frac{\Delta N}{\Delta A}=\frac{dN}{dA} \tag{1-2}$$

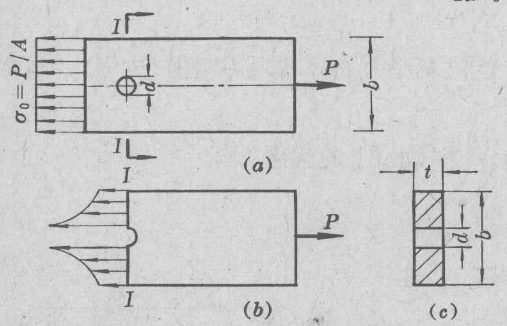


图 1-7

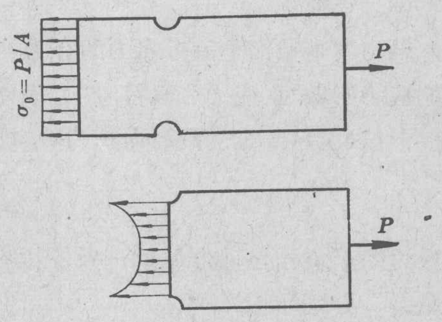


图 1-8

“应力集中”是应力非均匀分布的一个例子。当杆的截面尺寸有突然的变化，应力在截面上的分布就不均匀，而出现应力集中的现象。例如，当杆上有孔洞(铆钉孔等)如图 1-7*a*，或有缺口如图 1-8*a*，则在孔口或缺口附近的应力将局部突出地增大，如图 1-7*b* 及 1-8*b* 所示，在离孔口或缺口稍远的地方应力分布仍趋均匀。**这种应力在局部地点剧增的现象就叫“应力集中”**。图 1-9

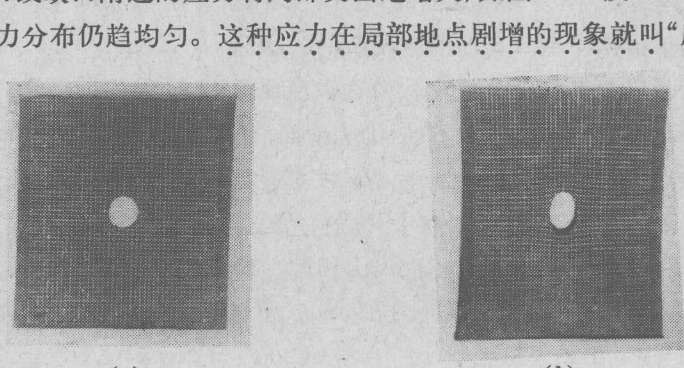

(*a*)　　(*b*)

图 1-9

示一个具有圆形孔洞的橡皮模型受拉后，圆孔变为椭圆，变形前的方形网格线在变形后的形状可以表明孔口应力集中处变形最利害的情况。

当有应力集中时，要确定截面上各点的应力须用弹性力学的知识，超出本课程任务范围。但在实际工程计算中一般都仅仅计算其平均应力。以图 1-7 的孔口截面为例，图 1-7c 示孔口截面 I-I 的尺寸，其毛面积为 bt，由于孔洞削去了面积 dt，故余下的净面积为

$$A_{净}=bt-dt=(b-d)t$$

截面 I-I 的平均应力为

$$\sigma_{平均}=\frac{P}{A_{净}}=\frac{P}{(b-d)t}$$

在其它没有被孔洞削弱的截面上应力仍为

$$\sigma_0=P/A=P/bt$$

例 1-2 一拉杆，其圆截面的直径为 2 cm，两端所受外力为 $P=100$ kN，如图 1-10 所示；求其截面上的正应力。

解：首先用截面法求轴力，得

$$N=100\ \mathrm{kN}$$

截面面积为

$$A=\frac{\pi}{4}\times(0.02)^2=3.14\times10^{-4}\ \mathrm{m^2}$$

所以，截面应力为

$$\sigma=100/(3.14\times10^{-4})=318\times10^3\ \mathrm{kPa}$$

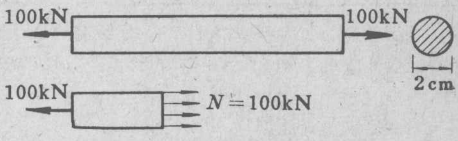


图 1-10

§1-3 轴向拉伸和压缩的强度条件

一、极限应力 容许应力 安全系数

当外力逐渐加大时，杆件横截面上的正应力也相应逐渐加大以反抗外力。但任何材料制作的杆件其截面应力的增长都存在一个材料所固有的极限，到此极限时，杆件就要发生工程实践所不能容许的某种变形情况，例如杆件断裂，或虽不断裂而出现永不消失的“塑性变形”，使杆件丧失其承载能力，不能再正常工作，甚至面临灾难性事故。这时的应力叫做材料的极限应力，以符号“σ^0”表示，其值由试验确定。

拉(压)杆的实际的最大应力必须小于其材料的极限应力。到底小多少，这要考虑多方面的因素，其中最重要的是：(1)荷载变异，即我们建造的结构可能遇到大于设计荷载的荷载；(2)材料变异，即施工时所用的材料可能不合规格，可能尺寸偏小、质量较差；(3)结构的工作条件较差(如腐蚀、高温等)；(4)应力计算理论不能准确地符合实际；等等。在工程实际中，有关部门根据大量的调查研究，给各种材料分别规定了一个比其极限应力要小得多的应力，作为设计的依据，这种应力叫做材料的“容许应力”，也称“许用应力”。以符号$[\sigma]$表示。

极限应力 σ^0 与容许应力$[\sigma]$的比值叫做“安全系数”；以“n”表示安全系数，则

$$n=\frac{\sigma^0}{[\sigma]} \tag{1-3a}$$

或
$$[\sigma]=\frac{\sigma^0}{n} \tag{1-3b}$$
安全系数 n 是一个大于 1 的数，它反映人们给予材料的强度的储备量，也就是反映材料在工作中安全可靠的程度。

确定容许应力实质上就是确定安全系数。确定安全系数是一个严肃的问题，安全系数低了，构件不够安全；高了，则浪费材料。安全和节约应该兼顾，使矛盾得到统一。

我国一九七五年由国家基本建设委员会和冶金工业部共同公布的《钢结构设计规范》TJ17-74 对于钢材抗拉、抗压和抗弯的容许应力规定如表 1-1。

表 1-1　钢材的容许应力

应力种类	符号	单位	3 号钢		16 锰钢或 16 锰桥钢		
			第 1 组	第 $\frac{2}{3}$ 组	第 1 组	第 2 组	第 3 组
抗拉、抗压和抗弯	$[\sigma]$	kPa*	170×10^3	155×10^3	240×10^3	230×10^3	215×10^3
		kg/cm²	1700	1550	2400	2300	2150

［注］表 1-1 中所谓第几“组”，是按钢材尺寸来分的。例如三号钢，凡棒钢的直径或厚度≤40(mm)的，型钢的厚度≤15的，钢板的厚度为 4～20 的，均为“第 1 组”。组数大的钢材尺寸大些，容许应力却小些。因为尺寸大了，具有瑕疵的概率会大些。

* 原表中无此横行。

二、拉(压)杆的强度条件

杆件中最大拉(压)应力所在的截面叫做杆件的“危险截面”，因为那里最容易出现破坏的危险。为了保证杆件的安全，必须使危险截面的最大拉(压)应力不超过材料的容许拉(压)应力。即危险截面最大应力应满足下述条件：
$$\frac{N}{A}\leqslant[\sigma] \tag{1-4}$$
这就是拉(压)杆的强度条件。如最大应力与容许应力相等，那么，从力学角度说，就达到了安全与经济的统一。如果最大应力太小于容许应力，那就造成材料的浪费。如果最大应力大于容许应力，就是强度储备不足，安全程度没有达到规定的标准(不过，当超额的应力不大于容许应力的5%，也可允许)。

例 1-3　一钢筋混凝土组合屋架的计算简图如图 1-11a。$P=13$ kN，钢拉杆截面的直径为 2.2 cm，钢的容许应力为$[\sigma]=170\times10^3$ kPa，试校核钢拉杆的强度。图中所示尺寸单位为毫米。

解：从正中央把屋架分为左右两半，并取左边为脱离体如图 b。C 节点是铰结，故应有两未知力 C_x 及 C_y，下弦杆 AB 截面上应有轴力 N。三个未知力都是舍去的右边部分给予脱离体的作用力。应明确指出．截取脱离体时不可截断上弦 AC 或 BC，因上弦不是拉杆或压杆，本章限于截断拉、压杆。支座反力 $3P$ 是从整个屋架(图 a)的平衡条件求出来的。

以 C_x 和 C_y 两未知力的交点 C 为矩心，建立平衡方程式 $\Sigma M_C=0$，即
$$1440N+200\times0.5P+1442P+2884P-4325(3P-0.5P)=0$$
由此得
$$N=4.5P=4.5\times13=58.5\text{ kN}$$

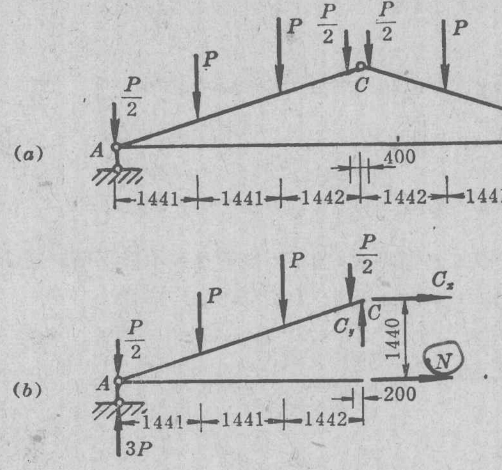


图 1-11

所以

$$\sigma=\frac{58.5}{\frac{\pi}{4}(2.2\times10^{-2})^2}=154\times10^3\ \text{kPa}<170\times10^3\ \text{kPa}$$ 故安全。

此例说明如何直接利用强度条件来校核杆的强度。

若一杆的尺寸已知，材料已知，即 A 和 $[\sigma]$ 已知，也可利用式(1-4)来确定其许可轴力 $[N]$。此时式(1-4)可改写成

$$[N]=A[\sigma] \tag{1-5}$$

例 1-4 今有一 16 锰钢的圆条，截面直径 $d=1.8$ cm，其极限应力为 $\sigma^0=340\times10^3$ kPa，取安全系数 $n=1.5$；求材料的容许应力以及用此钢条作为拉杆时的许可荷载 $[P]$。

$[\sigma]=\sigma^0/n=\sigma^0/n.$

解:
$$[\sigma]=\sigma^0/n=340\times10^3/1.5=227\times10^3\ \text{kPa}$$
$$A=\frac{\pi}{4}\times(1.8\times10^{-2})=2.54\times10^{-4}\ \text{m}^2$$
$$[P]=[N]=A[\sigma]=227\times10^3\times2.54\times10^{-4}=57.3\ \text{kN}$$

当荷载及容许应力已知，还可利用式(1-4)来作"截面选择"。此时式(1-4)可改写为

$$A\geqslant\frac{N}{[\sigma]} \tag{1-6}$$

例 1-5 今有一 16 锰钢圆条，容许应力 $[\sigma]=227\times10^3$ kPa，承受轴向拉力 $P=60$ kN；问其直径至少应为若干厘米？

解:
$$A\geqslant P/[\sigma]=60/(227\times10^3)$$
$$=2.64\times10^{-4}\ \text{m}^2=2.64\ \text{cm}^2$$
$$d\geqslant\sqrt{4\times2.64/\pi}=1.84\ \text{cm}$$

取 $d=2$ cm。

例 1-6 图 1-12a 示一悬臂架。钢拉杆 AB 长 2 m，其截面面积为 $A_1=6\ \text{cm}^2$，容许应力为 $[\sigma]_1=160\times10^3$kPa。BC 为木杆，其截面面积为 $A_2=100\ \text{cm}^2$，其容许应力为 $[\sigma]_2=7\times10^3$kPa。(1)设 B 点的竖向荷载 P 为 10kN，试校核各杆强度；(2)求许可荷载 $[P]$；(3)设 P 等于许可荷载，重新确定钢杆 AB 的截面。

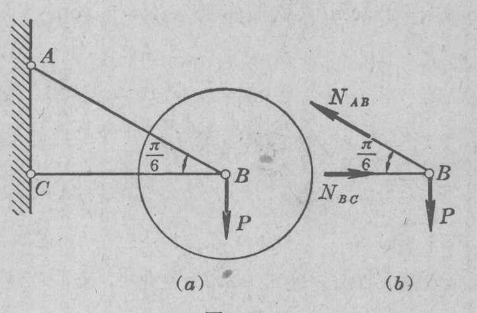


图 1-12