

高等學校教學用書



材料力学

CAILIAO LIXUE

阿·安·依留辛 維·斯·連斯基著

熊祝華 屈家溢譯

人民教育出版社



材 料 力 学

CAILIAO LIXUE

阿·安·依留辛 維·斯·連斯基著
熊祝华 屈家溢译

人 民 教 育 出 版 社



本书系根据苏联国立物理数学出版社 (Государственное издательство физико-математической литературы) 出版的阿·安·依留辛 (А. А. Ильюшин) 和維·斯·連斯基 (В. С. Ленский) 著的“材料力学” (Сопротивление материалов, Москва, 1959) 譯出。原书經苏联高等教育部审定为綜合大学用教学参考书。

本书共分八章, 分別讲述应力与变形, 杆件的彈-塑性变形, 复杂应力状态下的彈性和塑性, 塑性流动, 材料的蠕变, 材料的动力强度, 彈性体的振动和材料的疲劳, 以及力学試驗的方法和工具等。

材 料 力 学

阿·安·依留辛 維·斯·連斯基著

熊祝华 屈家澄譯

北京市书刊出版业营业許可証出字第2号

人民教育出版社出版(北京景山东街)

人民教育印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店經售

統一书号 K15010·1107 开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张 $12 \frac{18}{16}$

字数 260,000 印数 0001-4,000 定价(7) 1.50

1963年3月第1版 1963年3月北京第1次印刷

序

現代的結構和儀器經常是处于高溫或極低溫、大塑性變形、高速變形、穿透性放射照射和腐蝕性介質、高壓力等等極其複雜的條件下。因此，材料力學這門科學是變形固體力學的一部分，它需要關於材料變形和強度的愈益廣博的知識，俾能形成一些普遍的原則來建立表示荷載下材料性狀的物理-力學參數之間的关系，以及建立能正確反映結構物真實工作條件的計算理論。

材料力學發展的途徑，一方面是改善計算方法及擴大原來屬於應用彈性力學的問題的範圍。另一方面是研究新的現象，擴大科學的物理基礎，以及從統一的觀點來說包括各個技術部門所屬問題的更為廣闊的範圍。這個第二個途徑將愈益成為綜合大學及工程-物理學院培養研究方面的專家所必需。

本書是以著者們幾年來在莫斯科大學數學力學系講授材料力學的講義為基礎而編寫的，同時也體現了材料力學發展的第二個方向。本書並不企圖包括一切內容，但除了最簡單的結構構件在彈性及彈塑性變形時的平衡及穩定問題以外，也包括了材料在壓力加工中的塑性流動，材料的蠕變，動力強度，振動及彈性和塑性波的傳播，以及溫度、變形速度、放射照射等等對材料強度及塑性的影響等方面的知識。也闡述了研究材料機械性質的實驗技術。

書中所應用的數學工具是一般的，實質上只限于常微分方程。在本書的若干章節中，解題的方法是用一般的形式給出的，並附有數量不多的說明例題。有經驗的講授者很容易彌補這個缺陷，而本書的讀者也能將所闡述的方法應用於各種新問題中。

著者希望讀者們提出自己的建議和意見，以便有助於克服在

实现著者意图中存在的困难，并提出改善本书内容及编写方法的途径。

著者对国立莫斯科大学弹性理论教研室的同仁、数学力学系的学生和研究生表示感谢，他们曾参加本书大纲的讨论，并在手稿付印的准备工作中给予了帮助。

目 录

序	vii
緒論	1
第一章 应力与变形	8
§ 1 材料的結構特性	8
§ 2 物体内各质点间的内部相互作用	18
§ 3 一点的应力状态的研究	25
§ 4 主正应力和主剪应力	28
§ 5 八面体面素上的应力	35
§ 6 一点附近的变形	41
§ 7 内力的功	50
§ 8 外力	55
§ 9 平衡条件以及确定物体內应力、变形和位移的一般方法	61
第二章 杆件的彈-塑性变形	65
§ 1 各种材料的机械性質	65
§ 2 各种因素对材料机械性質的影响	76
§ 3 关于塑性变形机构	92
§ 4 变截面杆。彈性解的方法	96
§ 5 杆件系統	101
§ 6 桁架計算	109
§ 7 材料的抗剪强度	118
§ 8 圓杆的扭轉	120
§ 9 杆的复合强度	125
§ 10 杆內的应力和变形	130
§ 11 杆的偏心拉伸-压縮。截面核心	139
§ 12 杆的承载能力	142
§ 13 杆的撓曲軸	146
§ 14 彈性地基上的梁	150
§ 15 縱橫弯曲。压杆的稳定	153
§ 16 杆在彈性极限以外时的稳定	158
第三章 复杂应力状态下的彈性和塑性	165

§ 1 材料的体积弹性	165
§ 2 固体剪变形的普遍弹-塑性性质	167
§ 3 P - p 試驗	172
§ 4 P - M 試驗和基本的塑性定律	177
§ 5 广义虎克定律和微小弹-塑性变形定律	185
§ 6 塑性条件	191
§ 7 在内外压力作用下圓筒的变形	196
§ 8 空心球的塑性状态	204
§ 9 薄壁容器的計算	206
§ 10 弯曲时的剪应力	207
第四章 塑性流动	213
§ 1 高热金屬的强度和塑性	213
§ 2 变形速度張量及有限变形	217
§ 3 塑性流动理論中应力和变形之間的关系	221
§ 4 表面摩擦	223
§ 5 条材在剛性板間的鍛压	228
§ 6 条材和壳体的挤压	232
§ 7 在剛性平面上的流动	236
§ 8 例题	242
第五章 材料的蠕变	247
§ 1 材料性质与時間的关系	247
§ 2 蠕变的力学理論	258
§ 3 复杂应力状态下的蠕变	262
§ 4 压力作用下的圓筒(平面变形)	268
§ 5 計算定常蠕变的相似方法	271
第六章 材料的动力强度	276
§ 1 动力强度的性质	276
§ 2 变形速度对屈服极限的影响	278
§ 3 变形速度对瞬时强度的影响	279
§ 4 屈服滞后和长期强度	280
§ 5 在动力荷载作用下的拉伸图	282
§ 6 撞击的技术理論	287
§ 7 杆中的纵波	290
§ 8 剪切波	294
§ 9 彈性纵波的反射	295
§ 10 杆与固定障碍物的撞击	297

§ 11 量杆理論.....	302
§ 12 按残余变形的分布繪制动力图 $\sigma-\varepsilon$	303
§ 13 加冲量法.....	306
§ 14 破碎和断裂强度.....	307
§ 15 集积流的形成.....	309
§ 16 钻进問題.....	313
§ 17 与結構物的撞击.....	318
第七章 彈性体的振动和材料的疲劳.....	319
§ 1 在振动荷载下材料及結構物的性能.....	319
§ 2 杆的纵向駐波和纵向振动.....	321
§ 3 杆的扭振.....	328
§ 4 杆的弯曲振动.....	330
§ 5 材料的疲劳現象.....	336
§ 6 疲劳特征与各种因素的关系.....	340
§ 7 疲劳破坏的开展.....	343
第八章 力学試驗的方法和工具.....	346
§ 1 概述.....	346
§ 2 試件的制造和准备試驗.....	346
§ 3 試件的几何性質.....	349
§ 4 靜力試驗机.....	351
§ 5 动力試驗机.....	360
§ 6 微小位移的量測.....	369
§ 7 測力設備.....	376
§ 8 量測变形的机械、光学及机械-光学的方法.....	380
§ 9 变形的电測法.....	388
§ 10 研究应力的光測法.....	394
§ 11 过程的光学記錄法.....	400

緒 論

材料力学是一門研究固体在实际条件下受外力作用时的强度及其对变形与破坏的抗力的科学。在材料力学中，將闡述結構构件及机器零件的强度与变形的計算方法。因此，它是变形固体力学的一个分支。

在材料力学中将研究：1) 固体材料(例如鋼、合金、混凝土)及其机械性質；2) 各种形状及各种用途的物体，例如杆、梁、板、壳及其他在結構物及建筑物(如鋼桥、水电站、船壳、飞机、火箭、发动机、仪器等等)中常碰到的构件，在軋制、冲压和挤压过程中的棒、带和板等等；3) 作用于物体的外力及加于这些物体的机械約束，例如重力，气体及液体的动压力，外部摩擦力及压力，物体与其他物体相互作用时产生的接触力，离心力及其他慣性力，由发动机及机器工作引起的动力及其他等等；4) 其他的外部影响：温度，化学活性介質，照射等等。

对物体的强度要求决定于物体的使用目的，它們可以是极其不同的。

在許多情况下，对强度的要求可归結为在实际条件下要求物体能在长時間內保持尺寸及形状不变，同时要有很高的精确度。属于这类的有工业与民用建筑物，工作机械(如压力机、軋制机、金属切削机床等等)，船舶和飞机結構等等。

在其他許多場合下，这些要求恰恰相反，是要物体在一定的条件下获得很大的塑性变形而不破坏，从而使物体易于从原来的形状变为預先規定的新的形状。属于这类的是在加热状态下的金属鑄錠，經過軋制、挤压、鍛造，可将它們制成金属板、鋼軌、型钢梁及

其他許多制品；在許多場合下，屬於這類的還有冷軋金屬薄板，用它們可在特种機床上製造出飛機、汽車、儀器的曲面薄殼。

在別的一些場合，物體的強度要求是要物體在實際條件下，當荷載到達一定的極限時，變形雖相當劇烈，但並不破壞，而在極限荷載下則按一定的方式破壞。屬於這類的有某些裝有“薄弱元件”的測量儀器、安全裝置等，在一定的荷載下，“薄弱元件”破壞，使力停止對結構的繼續作用，從而預防結構的嚴重損害。

物體強度不夠的原因可以是極其不同的，但歸根到底可歸納為：或是物體設計不正確及強度計算有錯誤，或是物體的材料選擇不合理，或沒有充分考慮材料的性質、沒有正確考慮作用的外力、溫度條件及其他條件。通常，物體的破壞是從物體內某點開始的，從而導致整個物體的破壞。

彈性是所有真實固體的基本性質，這是物體在外部荷載作用下，在一定限度內的一種可逆變形的能力，即當引起變形的外部因素移去時，變形本身亦消失。彈性變形體的概念是材料力學的基础。

物體發生的振動，常常是結構物、建築物及機械破壞與事故產生的原因。既然一切物體在某種程度上都是彈性的，因此，它們具有許多固有振動頻率。設物體因外力作用而變形，此後外力又突然移去，物體將發生振動，這種振動的頻率是固有振動頻率。例如，設在兩端鉸支的杆的中點加上荷載，然後又將此力突然移去，於是杆便會產生如此的振動，即在每一時刻撓曲軸將是正弦半波曲線，節點（不動點）是在固接的地方（圖 1, a）。現在，設使同一杆受到兩個相等但方向相反的作用，作用點在距支座為 $\frac{1}{4}$ 杆長的地方，然後又將這些力卸除，於是，在振動時撓曲軸的形狀將是具有三個節點的正弦全波，其中兩個節點在固接端，一個在中央

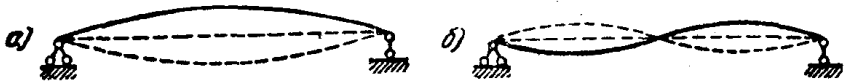


圖 1

(图 1, б)。第二种情况下的振动频率将是第一种情况的四倍。这种最简单的振动形式及与之相应的频率，每个弹性体有无限多。在一般的振动情况下，这些可能的不同振动形式是彼此叠加的，不过，在一些条件下占优势的是某些振动形式及与之相应的频率，而在另一些条件下，又是别的一些占优势。由于作用于桥上的风力引起的巨大振动，使世界上最大的桥梁之一——美国的塔科马桥在 1940 年毁坏了。只要出现共振的条件（外力频率与某一固有振动频率相重合的条件），就有可能使相应形式的振动的振幅急剧加大，因而也就有可能使强度破坏。但是，在工程中不是常常可能和必需避免共振状态的。现在有些试验及生产用的机械是按共振原理工作的，它们具有专门的构造。某些振动及疲劳试验机就是这种例子。

结构物或建筑物破坏的原因常常是因为个别构件的平衡状态丧失稳定性。如在直立于桌上的细长直尺顶端加上一大于某临界荷载的力时，直尺急剧弯折现象就是一个例子。在工程史上，我们知道许多重大事故和惨剧，其中如桥梁、房屋、船舶以及其他建筑物等的破坏，其突出的原因就是丧失稳定。例如，可举在汉堡的容量为 600,000 米³的大贮气罐的毁坏作为一个例子，这个贮气罐在 1909 年 12 月 7 日进行试验性充气时，由于支承装置的构件之一丧失稳定而倒塌了。

物体产生大变形的原因是物体在其个别部分或各部分出现塑性状态或者屈服状态，此时荷载增长不大，引起物体的变形较大。应该注意到，几乎所有的固体物质在某种程度上都具有塑性性质，因此，在高压下甚至像一般被认为是脆性的材料也可以流动而

不破坏。例如处于地壳中的岩石，在各向高压作用下能承受巨大的塑性变形而流动。

金屬的蠕变是在高溫下工作的机械零件，例如燃气輪机的叶片及导向装置，噴气发动机的外壳等等发生很大塑性变形和破坏的原因。这种性质和在蜡杆上悬挂重物时所发生的流动性质是相似的，由于溫度的不同，蜡杆在定值荷載下将以某种速度伸长，而最后被拉断。

机械的重要部件，如发动机的軸及其他机件毀坏的极其普遍的原因是材料的疲劳，設在物体上加以多次重复的荷載，就会出现材料的疲劳现象。在发动机工作期間，它的軸要轉动千百万次，而每轉动一次，荷載就重复改变一次，人們要折断金屬絲时；將金屬絲往相反方向多次急剧弯折，这就是利用材料的疲劳性质；在这样反复弯折时，給予金屬絲的曲率愈小，則折断它所需反复弯折的次数也愈多。研究这种现象的結果表明，只有当物体变形最大部分的变形幅度超过某一确定的极限值时，在物体內才会出現疲劳。假使在振动过程中，最大变形不超过极限值，則零件可以在实际上为无限长的期間內工作而不会疲劳破坏。

所有物体的材料都具有內摩擦，絕大多数物体的內摩擦与其各质点間相对运动的速度有关，而且随速度的加快而增长。內摩擦的概念將各种性质的內耗力汇总为一个名詞。由于有內摩擦，以及由于有經常存在于物体与周围介质間的摩擦，物体內所发生的振动，在周期干扰力停止作用后很快就消失。物体对变形的抗力常在某种程度上决定于变形速度，而变形速度又与外部加載速度有关。当变形速度很大时，例如在撞击荷載下所发生的变形速度时，金屬在常溫下对进入塑性状态的抗力可以增长1—2倍，而聚合物（如橡皮）对变形的抗力即使在彈性变形限度內也会大大增加。

当外力作用于物体上时,可以出現所有以上列举的材料性质,它們在某种程度上决定着物体的强度。同时,假使物体发生破坏,也决不是一下子整个物体都破坏的,而是先从一点或者若干点开始,此后就以有限的速度扩展到整个物体。

如果考虑到在实际中必然碰到的物体的多种多样性,材料及其性质的多种多样性,物体間相互作用形式及作用于物体上的力的多种多样性,以及温度状况和其他条件的千差万别,那末,对解决固体强度問題作普遍性科学解释的企图,驟看起来好像是无望的。作用于某种大小尺寸的物体边界上的外部影响,会貫入物体的内部,并按不同方式傳遞到物体的各个基粒:分子、离子、原子。假如考虑到較大的固体,例如金属体,其綫性尺寸从一毫米到几十米或几十米以上,在工程实际計算中經常遇到这种尺寸,包含有 $10^{20} \sim 10^{40}$ 个原子,那末,很明显,企图計算作用于每个指定的原子上的影响程度是毫无办法的。但是,物体的原子学說的本質提供了为什么固体能变形的概念(很明显,是因为原子之間的距离,它們之間的相对位置,以及原子本身的尺寸都可以改变),說明了物体形状及尺寸可能发生的变化为什么有如此之多(如果不考虑原子本身的变形,則被看成为质点的每个原子有三个自由度),以及解釋了各个原子間相互作用有怎样的变化特征(当原子相互接近和离开时,会发生排斥力和吸引力)。从物体的原子学說的本質可以得出結論:研究固体的强度与研究物体微小部分相对位置的改变(即变形)及研究由于变形而产生的各部分間相互作用的改变(即內应力)有关。

但是,在研究各种材料的变形抗力和破坏抗力的强度和規律时,如果因为我們还不知道用什么方法来計算物体內大量原子之間多种多样的相互作用,而不取原子作为原始研究对象的話,于是便发生了一个問題:究竟在整个物体內要取怎样小的一部分作为

研究物体内部分形和应力的基本对象，如果已考虑到所有这些部分所处的状态各不相同的话。

如所周知，固体可分为非結晶体和結晶体。并认为：在非結晶体中（玻璃和电木是其典型代表）原子及分子的排列是混乱的，沒有一定的排列方向，因此，非結晶体是各向同性的，就是說它們的机械性質、光学性質及电学性質在各个方向上都是一样的。非結晶体的特征綫性尺寸为原子間的間距是平均的。結晶体的典型代表是金屬，与上述非結晶体相反，結晶体具有規則的結構，它們的基本微粒（原子、离子）按一定的次序排列。例如，鉄具有立方晶格。但是鉄块并不是晶体，而是由顆粒构成的多晶体，顆粒是許多晶体（晶格）的集合，其尺寸的大小約为 0.01 毫米或更大一些，就是說，比原子間距大得多。每个晶体是各向异性的，即在不同方向具有不同的性質，它的特性不仅与尺寸和形状有关，而且与由物理性質确定的空間方位有关。但是，单个的顆粒仍然不能作为研究大物体中内部应力及变形的基本体积，其原因主要是和原子不能作为研究对象是一样的；在这里，情况变得更坏，因为顆粒的形状是不規則的，并且极其复杂，而顆粒的相对方位一般說来也是紊乱的。

在力学中，作为研究物体内部分形和变形的基本对象的，是取物体这样微小的体积，即在这种微小体积內，实际上包含了非常多的原子，甚至許多顆粒，但在数学上却假定它是无穷小。現在，假定位移、应力和变形是物体内点的坐标和時間的連續的和可微分的函数。以后还假定，由于加于物体上的外部作用而在物体内每点处所发生的內应力，只决定于該点因外部作用而产生的变形，决定于溫度和時間。这样，在力学中，除了“絕對剛体”的概念外，还产生了“質量連續体”或“連續介質”的新概念，特別是“連續变形固体”的新概念。这个概念，不只是因为使得在进行强度研究时能够应用数学分析这一强有力的工具，因而在理論和計算方面是极

为有用的,而且,在实验方面也很有用,因为已经查明,对于研究固体的强度来说,起作用的只是机械性质,即应力、变形、时间和温度之间的关系,而不是由真实固体的物理状态所完全确定的复杂作用的全部总和。由此就产生了研究各种材料机械性质的专门的实验方法。同时,早在一百多年以前,就产生了连续介质力学或连续体力学以及关于固体强度的这样一些基本科学:如材料力学,结构力学,弹性理论和塑性理论。

实质上,本书将要阐述的主要内容三个基本部分:1)关于位移、内应力、变形及内力功的基本概念,以及关于固体微小单元体加载过程的基本概念;2)固体的基本机械性质,如弹性及理想塑性,流动,蠕变和松弛,粘性和动力强度,疲劳和破坏;3)运动的和几何的基本假设,这些假设使得有关固体在各种外部作用下的应力、变形、位移和破坏问题的数学演算,以及有关固体变形和强度问题的基本方程及其解法得到大大的简化。材料力学的方法与弹性和塑性理论的更精确的方法的区别,主要在于引用了一系列运动性质的和几何性质的简化假设,但是在大多数情况下,材料力学的方法仍然是足够精确的。

第一章 应力与变形

§ 1. 材料的结构特性

金属是工程中应用得最为广泛的材料。对金属的性质及其内部结构进行专门研究的有这样一些学科,如金属物理学,金相学和金属学。金属物理学是从金属的各种物理性质(导电性、传热性等)方面研究金属结构的理论基础,而金相学和金属学则在很大程度上是研究金属及其合金的生产工艺过程的。

金属和其他许多材料的区别在于它的结晶组织,这就是原子按几何规则有规律地排列,形成空间晶格。用X-光结构分析法可以揭示这种结晶组织是存在的。微粒、原子的几何排列确定着各种各样的晶格类型,根据这种几何排列以及原子结构,可以将不同的晶体区别开来。

在大多数金属中,晶格常有三种类型:体心立方晶格、面心立方晶格与六方晶格。

在体心立方晶格的单位晶格中,原子是排列在立方体的角顶上和立方体的中心处(图2, a)。这种晶格有一个特征线性尺寸,即立方体的边长 a ,这便是所谓晶格参数。

在面心立方晶格中,原子排列在立方体的角顶上和各个面的中心处(图2, b)。这种晶格类型也是由一个参数决定的,就是立方体的边长 a 。

六方晶格的单位晶格,是底边长为 a 、高为 c 的正六边形棱柱体,这种晶格类型有两个参数,即 a 和 $\frac{a}{c}$ 。在这种单位晶格中,原子排列在棱柱体的每个角顶上和柱体两个底面的中心处,此外,还有

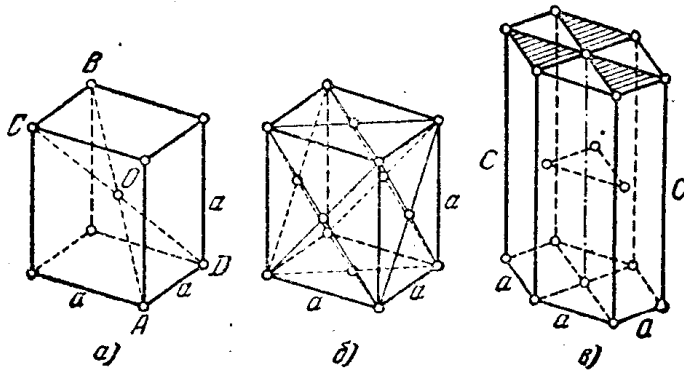


图 2

三个原子分布在三个不相邻的三角形柱体的中心处，用通过柱体軸綫的三个对角平面，便能將六角形柱体分成为上述的三个三棱柱体(图 2, c)。

晶格綫性参数 a 的数量級为: $2 \sim 5 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-8}$ 厘米)。例如，鉄的 γ 变体(参看后面): $a = 3.56 \text{ \AA}$ ，鉄的 α 变体的参数: $a = 2.86 \text{ \AA}$ ，銅的 $a = 3.61 \text{ \AA}$ ，鋁的 $a = 4.04 \text{ \AA}$ 。如果考虑到原子具有同一数量級的綫性参数(原子直徑)，就可知原子是十分紧密地填充在单位晶格內的。所以有时在晶格中将原子表示为彼此紧贴着的球形。整个晶格的紧密程度和原子間相互約束的强度可用配位数來說明。所謂配位数，就是距一个給定原子有同样距离的原子个数。在晶格中，如果沒有填满原子的地方愈少，則其配位数便愈大。

属于单位晶格中的原子个数，叫做这个单位晶格的基数。

事实上，例如在体心立方晶格(图 2, a)中，原子 A 和原子 D 是不应属于所示的同一单位晶格的，因为它们同时也是相邻单位晶格的結点元素。为了弄清楚在一个单位晶格中究竟有多少个原子，我們可以給所有原子一个不大的、同样的位移，例如平行于对角綫 AB 方向的位移(或者一般地在不位于单位晶格边界平面內任何方向上的位移)。这时除了原子 A 和原子 O 以外，其余所有原子都