

高等学校试用教材

工程力学

下 册

上海纺织工学院等八院校合编

人民教育出版社

高等学校试用教材

工 程 力 学

下 册

上海纺织工学院等八院校合编

人 民 教 育 出 版 社

本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力学教材会议讨论的《工程力学》教材（纺织类）编写大纲编写的。全书分上、下两册，上册为理论力学部分，下册为材料力学部分。本册内容包括：基本概念、轴向拉伸（压缩）及材料的机械性质、剪切、扭转、杆件平面弯曲时的强度问题、直杆平面弯曲时的刚度问题、用变形能法计算位移、静不定问题、应力状态理论和强度理论、杆件组合变形时的强度计算、动载荷、交变应力、构件的稳定问题、平面图形的几何性质以及专题断裂力学简介和实验应力分析概述等。

本书主要适用于纺织类专业，也可供有关专业和工程技术人员参考。

本书由上海纺织工学院、天津纺织工学院、西北轻工业学院、大连轻工业学院、无锡轻工业学院、苏州丝绸工学院、浙江丝绸工学院和上海纺织工业专科学校等八院校合编，由上海纺织工学院主编。

高等学校试用教材

工程力学

下 册

上海纺织工学院等八院校合编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

肇东印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 19 字数 463,000

1979年7月第1版 1983年3月第5次印刷

印数 19,301—24,000

书号 15012·0181 定价 1.55 元

编者的话

工程力学是高等学校工科的一门技术基础课,是其它技术基础课和有关专业课的基础。同时,掌握必要的力学理论、实验技能和力学的分析方法也是为解决先进工程技术中有关的力学问题与从事这方面的科学研究奠定一定的基础。

工程力学是一门系统性强、理论性严密,但又与生产实践紧密联系的学科。为了使学生很好地掌握力学的基础理论、基本方法和基本实验技能,并能运用这些知识对一般工程实际中的力学问题进行科学抽象和理论分析,我们在教材编写中着重考虑了理论的系统性和正确贯彻理论联系实际的原则。

本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力学教材会议讨论的《工程力学》教材(纺织类)编写大纲编写的。全书分上、下册,上册为理论力学部分,下册为材料力学部分。上册附有“锭子的临界转速”专题;下册附有“断裂力学简介”和“实验应力分析概述”两个专题。各章并附有小结、复习思考题和习题及部分习题答案。本书基本部分是按照200~240学时的要求编写的,并兼顾到学时数相当的机械类专业的使用,其中带*号的内容及所附专题可根据专业的不同要求决定取舍。

本书由上海纺织工学院、天津纺织工学院、西北轻工业学院、大连轻工业学院、无锡轻工业学院、苏州丝绸工学院、浙江丝绸工学院和上海纺织工业专科学校等八院校合编,由上海纺织工学院主编。参加上册编写的有:西北轻工业学院陈兆民(第一、二、三章),苏州丝绸工学院陈世禄(第四章),上海纺织工业专科学校赵

关康(第五、十五、十六章),上海纺织工学院王惠予(第六章),大连轻工业学院汤伯慈、仇德仁(第七、八、九、十章),天津纺织工学院汪群、陶树林(第十一、十二、十三、十四章及专题),由王惠予主编。参加下册编写的有:天津纺织工学院汤宝润、冯德生(第一、二章及专题 I),浙江丝绸工学院周盛才(第三、四章),上海纺织工学院谢士忠(第五、六、七、八章),上海纺织工业专科学校陈贵令(第九、十、十一、十二章),无锡轻工业学院彭蕙苓(第十三章及附录),苏州丝绸工学院于昌荣(专题 II),由谢士忠主编。

本书由北京工业学院、北京化工学院和西安交通大学主审,参加审阅的还有华东石油学院和南京化工学院。审稿同志认真审阅了原稿并提出了许多改进意见,在此表示衷心的感谢。由于我们水平有限,书中一定存在缺点和错误,希望读者批评指正。

编 者

一九七八年十二月

目 录

引言	1
第一章 基本概念	3
§ 1-1 材料力学的研究对象及基本假设	3
§ 1-2 外力、内力、应力	6
§ 1-3 杆件变形的基本形式	11
复习思考题	12
习题	12
第二章 轴向拉伸(压缩)及材料的机械性质	15
§ 2-1 轴向拉伸(压缩)的实例及概念	15
§ 2-2 轴向拉伸(压缩)时横截面上的内力和应力	16
§ 2-3 轴向拉伸(压缩)时斜截面上的应力	20
§ 2-4 轴向拉伸(压缩)时的变形	23
§ 2-5 拉伸和压缩时材料的机械性质	26
§ 2-6 弹性后效的概念	36
§ 2-7 应力集中的概念	37
§ 2-8 安全系数和许用应力	39
§ 2-9 轴向拉伸(压缩)时的强度计算	41
小结	46
复习思考题	47
习题	48
第三章 剪切	56
§ 3-1 剪切的实例及概念	56
§ 3-2 剪切的实用计算	57
§ 3-3 纯剪切、剪应力互等定理	64
小结	67
复习思考题	68
习题	69

第四章 扭转	72
§ 4-1 扭转的实例及概念.....	72
§ 4-2 外力(偶)矩、扭矩及扭矩图.....	74
§ 4-3 圆轴扭转时的应力和强度条件.....	77
§ 4-4 圆轴扭转时的变形和刚度条件.....	85
*§ 4-5 非圆截面杆扭转简介.....	92
小结.....	99
复习思考题.....	101
习题.....	102
第五章 杆件平面弯曲时的强度问题	107
§ 5-1 直杆弯曲的实例及概念.....	107
§ 5-2 直梁的内力、剪力图和弯矩图.....	110
*§ 5-3 分布载荷、剪力和弯矩之间的关系及其应用.....	121
§ 5-4 直梁平面弯曲时的正应力和强度计算.....	129
§ 5-5 从强度考虑合理设计梁的几个问题.....	141
§ 5-6 梁的剪应力概述.....	149
*§ 5-7 非对称截面梁的平面弯曲.....	155
*§ 5-8 曲杆平面弯曲时的强度问题简介.....	156
小结.....	160
复习思考题.....	162
习题.....	163
第六章 直杆平面弯曲时的刚度问题	175
§ 6-1 直杆弯曲变形的实例及概念.....	175
§ 6-2 直梁的挠曲线近似微分方程及其积分.....	177
§ 6-3 梁的刚度条件.....	192
§ 6-4 用叠加法计算梁的变形.....	193
*§ 6-5 用面积矩法计算梁的变形.....	201
§ 6-6 提高梁弯曲刚度的措施.....	206
小结.....	209
复习思考题.....	210
习题.....	212
第七章 用变形能法计算位移	217
§ 7-1 变形能的概念.....	217
§ 7-2 杆内变形能的计算.....	218

§ 7-3 莫尔积分的推导及其应用	225
小结	235
复习思考题	236
习题	237
第八章 静不定问题	243
§ 8-1 静不定问题的实例及概念	243
§ 8-2 简单静不定问题的解法	245
*§ 8-3 连续梁、三弯矩方程式	262
小结	271
复习思考题	272
习题	273
第九章 应力状态理论和强度理论	281
§ 9-1 一点应力状态的概念	281
§ 9-2 应力状态的实例和分类、主平面和主应力	282
§ 9-3 受内压的圆筒形薄壁容器的应力计算	285
§ 9-4 二向应力状态分析	288
§ 9-5 三向应力状态的最大应力	303
§ 9-6 广义虎克定律	305
§ 9-7 强度理论(极限应力状态理论)简介	309
小结	319
复习思考题	321
习题	322
第十章 杆件组合变形时的强度计算	329
§ 10-1 组合变形的实例及概念	329
§ 10-2 斜弯曲的概念	332
§ 10-3 弯曲与拉伸(压缩)的组合、偏心拉伸(压缩)	336
§ 10-4 弯曲与扭转的组合	343
小结	359
复习思考题	360
习题	360
第十一章 动载荷	370
§ 11-1 动载荷的实例及概念	370
§ 11-2 构件作等加速直线运动或等速回转运动时的应力计算	372
§ 11-3 构件受冲击时的应力计算	382

§ 11-4 降低构件冲击应力的措施、冲击韧性	392
小结	398
复习思考题	400
习题	400
第十二章 交变应力	408
§ 12-1 交变应力和疲劳破坏的概念	408
§ 12-2 构件疲劳破坏的特征和破坏原因的假说	410
§ 12-3 应力循环特性	413
§ 12-4 持久极限及持久极限曲线	416
§ 12-5 影响持久极限的主要因素	421
§ 12-6 提高构件持久极限的措施	423
*§ 12-7 杆件在交变应力下受基本变形时的强度校核	426
*§ 12-8 杆件在交变应力下弯曲与扭转组合时的强度校核	433
小结	440
复习思考题	442
习题	442
第十三章 构件的稳定问题	452
§ 13-1 压杆稳定的概念	452
§ 13-2 压杆临界力计算	454
§ 13-3 其它构件稳定问题简介	461
§ 13-4 提高构件稳定性的措施	464
小结	468
复习思考题	468
习题	469
附录 平面图形的几何性质	472
§ 1 静矩	472
§ 2 惯性矩、惯性积、平行移轴公式	474
§ 3 惯性矩和惯性积的转轴公式、主惯性轴和主惯性矩的概念	482
习题	486
专题 I 断裂力学简介	490
§ I-1 引言	490
§ I-2 断裂问题的提出	491
§ I-3 线弹性断裂力学的基本理论	493
§ I-4 小范围屈服区域及应力强度因子的近似计算	499

§ I-5 应力强度因子 K 的计算资料	506
§ I-6 在脆性破坏问题中的应用	511
§ I-7 在疲劳设计中的应用	517
§ I-8 断裂韧性 K_{IC} 测定的试验方法	520
专题 II 实验应力分析概述	526
§ II-1 电测法的基本原理和仪器	526
§ II-2 电桥原理及其应用	529
§ II-3 平面应变分析及电阻应变花的应用	537
§ II-4 动态电测简介	544
§ II-5 光弹性实验概述	550
§ II-6 光弹性实验的基本原理和仪器	551
§ II-7 光弹性实验技术和分析方法	562
§ II-8 全息照相术在光弹性中的应用	567
型钢规格表	575
材料力学部分主要字符表	596

引言

各种机器和结构物都是由构件组成的。为了保证机器或结构物的正常工作，所设计的构件必须满足下列几个基本要求：

(1) 要求构件在受到载荷作用时不发生破坏，例如起重机的吊索在起吊重物时不被拉断，机器上的传动轴在传动时不被破坏等，因此要求设计的构件必须具有足够的抵抗破坏的能力，也就是要具有足够的强度。

(2) 受力构件虽然没有破坏，但是受到载荷后构件产生的变形若超过了允许的范围，机器或结构物也不能正常工作。例如机床主轴如果弯曲变形过大，将会影响加工精度，并使轴承引起不均匀磨损；因此要求构件在受到载荷后产生的变形应在工程上允许的范围以内，也就是要具有足够的刚度。

(3) 构件在载荷作用下，如果其原有形状下的平衡不能保持为稳定的平衡（例如受压的细长杆件，当压力增大到一定限度后，杆件会突然变弯），这会导致丧失工作能力，这种现象称为失去稳定，简称失稳。因此要使构件在受到载荷后，不致失去原来的平衡形式，也就是要具有足够的稳定性。

构件具有足够的强度、刚度和稳定性是保证正常工作的三个基本要求。一般地说，如构件选用强度较高的材料及较大的截面尺寸是能满足这些要求的。但是设计必须符合经济节约的原则，尽量降低成本，减少消耗，避免大材小用、良材劣用的情况；并且工艺上有时还要求尽量减轻构件的自身重量。因此安全和经济两者之间往往存在着矛盾。材料力学的任务就在于研究构件的强度、

刚度和稳定性问题，以便合理地解决这个矛盾。也正是在解决这个矛盾的过程中，材料力学得到了不断的发展。

在一般情况下，保证构件的强度、刚度和稳定性是主要方面，但是在生产实践中，对某个构件或加工工件有时却要利用破坏或较大的变形以达到机器或工艺上的要求。例如机器上的保险销，当机器发生意外超载到一定程度时，要求能首先断裂，以保证整个机器或主要构件的安全；又如冲剪工件时，在一定冲剪力下要求被冲剪工件能够符合加工要求；再如机器或车辆上为了减小冲击和振动，或者要构件有较大的变形（如片梭织机投梭用的扭轴），需要采用弹性好、变形大的弹簧或构件；等等。所有这些都是有关强度、刚度或稳定性的问题。因此我们要利用这些特性来达到设计的预期要求，为社会主义建设服务。

在研究构件的强度、刚度和稳定性的问题时，还必须了解所用材料的力学性质（或称机械性质），这些力学性质都需要通过试验来测定。此外在生产实践中的一些构件，由于受力比较复杂，还会遇到单靠现有理论计算解决不了的问题，必须借助于试验来解决。例如通过电测或光测等方法对构件进行应力和应变分析，作为强度鉴定及改进设计的依据。所以试验在材料力学中占有重要的地位。

必须指出，在工程设计中，材料力学只是从强度、刚度和稳定性问题方面为设计构件提供了必要的基础理论，但是设计构件时还需要考虑到其它方面，如工艺、结构、加工等等，综合各方面的条件才能够比较全面地解决好安全和经济的矛盾，使所设计的结构达到较好的设计要求。

随着科学技术和生产建设的发展，对力学又提出了一系列新的课题，例如超高强度钢的断裂韧性问题，各种复杂结构的应力分析问题，复合材料的强度和刚度问题等等。这些问题的解决，不仅有利于促进生产的发展，而且也将进一步丰富材料力学这门学科。

第一章 基本概念

§ 1-1 材料力学的研究对象及基本假设

(一) 研究对象

我们知道,任何固体在外力作用下,都要发生变形。本书的理论力学部分是研究物体平衡及运动问题的一般规律,因此,在外力作用下物体的微小变形对于平衡及运动来讲是个次要因素,可以不加考虑,而把物体看成是绝对刚体。但是材料力学是研究构件的强度、刚度和稳定性问题的学科,在这里,物体的变形是主要因素之一,因此必须加以考虑。绝对刚体这一概念在这里已不适用。

在外力作用下,物体将产生几何形状和尺寸的改变,但当外力除去后,物体就能恢复其原有的几何形状和尺寸,变形固体的这种基本性质称为弹性。若物体在外力除去后能够完全恢复原状,则称为完全弹性体;若不能完全恢复原状,则称为部分弹性体。

部分弹性体的变形有两部分,一部分是随着外力除去而消失的变形,称为弹性变形;另一部分是外力除去后不能消失而保留下来的变形,称为塑性变形,也称残余变形或永久变形。

物体产生塑性变形的性质,称为塑性。弹性和塑性性质的划分是有条件的,例如在同样的受力情况下,金属在常温下可以是弹性的,但在高温下却是塑性的了。自然界中大部分的物体都既具有弹性,又具有塑性。不过实验证明,金属、木材等材料,当外力不超过某一限度时,可以看成是完全弹性的;若外力超过了这一限度,就要产生明显的塑性变形,则材料就是部分弹性的了。

材料力学是以研究物体在弹性阶段内的强度、刚度和稳定性

为主要内容。

在工程实际中经常遇到的构件其长度比横向尺寸大许多倍,这种构件称为杆。杆的轴线可以是直线或曲线,因此又分为直杆(图 1-1)和曲杆。根据杆的横截面面积各处相等或不等,杆又可分为等截面杆及变截面杆,图 1-2 所示的吊钩是变截面曲杆的例子。

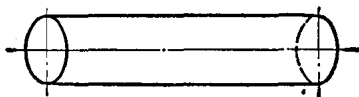


图 1-1

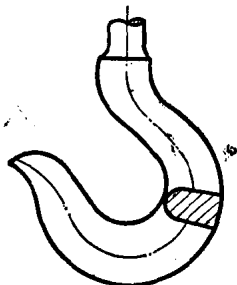
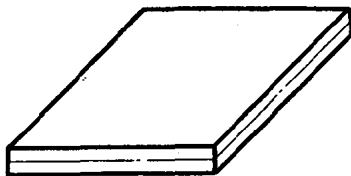
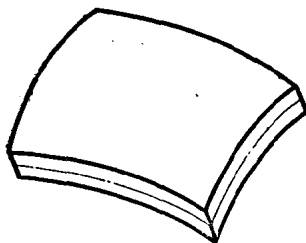


图 1-2

若物体的厚度远小于其它两个方向的尺寸时,平面的称为板(图 1-3a),曲面的称为壳(图 1-3b)。如平底容器的底就是板,圆筒锅炉的侧壁就是壳。



(a)



(b)

图 1-3

直杆在工程实际中应用很多,在力学分析上又最简单,所以材料力学主要以直杆作为研究对象。形状比较复杂而趋近于杆的构件,有时可近似地引用杆的方法进行研究,并得到近似的结果。

(二) 基本假设

为了便于研究,又能使得到的理论与实际情况比较符合,在材料力学中,根据问题的主要方面,采用下列的基本假设作为理论分

析的基础。

(1) 材料均匀连续的假设 即认为物体整个体积内部各处毫无空隙地都充满了性质相同的物质。实际上物体是由不连续的微粒组成,且物体各处的性质也不尽相同,但在材料力学中所研究的物体与组成它的微粒或晶粒比较起来要大得多,因此,根据这个假设所得到的理论与一般试件的实验结果能相当符合,所以,当从宏观角度来研究构件时,可认为整个物体的材料是均匀连续的。

这个假设对于钢、铜等金属材料相当符合,对于砖、石、木材等材料符合情况较差,但仍被采用。

(2) 材料各向同性假设 即假定材料在各个不同方向都具有相同的力学性质。这种材料称为各向同性材料。

构成物体的各晶粒,其性质本来是有方向性的,但在工程上所用构件的尺寸是远大于晶粒,而且这些晶粒又错综复杂地排列着,因而它们总体的统计性质在各个方向趋于相近。

均匀的非晶体,一般都是各向同性的。铸钢、铸铜、玻璃等都可看成是各向同性材料。

物体各向同性的性质是随外界条件而改变的,如轧制的钢材、拉拔的钢丝等由于加工关系,使它们的机械性能具有明显的单向性。此外,当钢的塑性变形不断增大时,也会从各向同性转化为各向异性。

材料力学主要是处理各向同性材料的问题,但所得结论也可以近似地用来计算一些各向异性材料的问题。

(3) 小变形假设 当受力物体所产生的几何形状或尺寸的改变量与其总尺寸比较起来很微小,或这种改变不影响力的作用时,我们称这种变形为小变形。在工程上一般杆件的变形都是很小的,因而在建立静力平衡方程或用叠加法进行强度、刚度计算时,可以不考虑外力作用点在物体变形时所产生的位移,这样能使

计算大为简化而所引起的误差却很微小。

应用上述假设时，一定要注意所研究对象的具体情况。如在研究材料断裂现象和断裂规律的断裂力学中，材料均匀连续假设就不再适用；又如在研究复合材料的问题时，材料各向同性假设也不再适用；再如在所研究的问题中，当构件变形较大，几乎与构件的最小尺寸属于同一量级的大变形时，小变形假设当然也不再适用。总之，假设要以事实为依据，要符合主要现象，而且根据它建立的理论又要能为实践所证实。材料力学主要讨论属于上述基本假设范围内的问题。

§ 1-2 外力、内力、应力

(一) 外力

关于外力的概念在静力学中已作过介绍，我们知道，外力是指某一物体受到其它物体的作用力，包括载荷及反力（约束力）。

按照外力在物体上的分布情况，可包括在物体体积内的体积力（物体本身的重量、惯性力）和连续分布在物体表面某一面积上的分布力（接触力，容器所受气体或液体的压力）。分布力的计算单位可用 Pa（帕斯卡）或 N/m^2 （牛顿/米²）。若外力分布面的宽度远小于长度时，这时分布力的单位用 N/m （牛顿/米）；若外力分布的面积远小于物体时，就可看成力作用于一点，这种力称为集中力，单位用 N（牛顿）。

按照载荷作用在物体上的性质，可分为慢慢地逐渐加于物体上的静载荷和作用于物体上引起显著加速度的动载荷。动载荷的种类很多，将在第十一章讨论。

(二) 用截面法求内力

内力是物体的一部分与另一部分相互作用的力。正因为物体

内部存在着相互作用的力，才使物体保持一定的形状。物体在外力作用下产生变形，即物体内部各质点之间的相对位置将发生改变，与此同时各质点间的相互作用力也发生改变。这种由外力作用而引起的物体内部相互作用力的变化量称为附加内力。显然，这种附加内力是随外力的变化而改变的。当外力增大时，附加内力也会相应地增大，不过这种增大有一定限度，若附加内力超过这一限度，物体就会被破坏。不同的材料有不同的限度，也就是有不同的强度，所以附加内力与强度是密切联系着的。材料力学研究的就是这种附加内力。为了方便，以后把附加内力简称为内力。

为了要求出内力，必须显示内力，例如欲求图 1-4a 所示等截面直杆在与轴线重合的外力 P 作用下，在 $m-n$ 截面上的内力。可假想地用一平面沿 $m-n$ 截面把杆截成 A 、 B 两段，我们可以任取一段，例如取出左段 A 进行分析。杆原来在拉力 P 作用下处于平衡状态，则截开后的左段 A 仍应保持平衡，在左段 A 上，除受外力 P 作用外，在截面 $m-n$ 上必有

内力作用，如图 1-4b 所示，它是右段 B 对左段 A 的作用力。由于材料的连续性，这些内力在截面 $m-n$ 上也是连续分布的。根据左段 A 的平衡条件， $m-n$ 截面上分布内力的合力必与外力 P 数值相

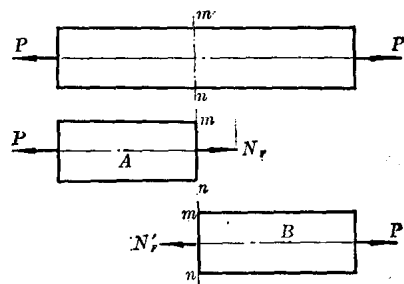


图 1-4

等、方向反向、并且力作用线重合，即

$$\sum X = 0, \quad P - N_F = 0$$

所以

$$N_F = P$$

式中 N_F 是横截面上的内力，作用线与轴线重合。

如果截取右段 B 讨论，也可得到 $N'_F = P$ ，如图 1-4c 所示，实