

高等学校试用教材

材料力学

上册

孙训方 方孝淑 关来泰 编

人民教育出版社

高等学校试用教材

材 料 力 学

上 册

孙训方 方孝淑 关来泰 编

材料力学
上册
孙训方 方孝淑 关来泰 编
人民教育出版社
1981年11月第1版
1981年11月第1次印刷

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基础课力学教材会议上讨论的“《材料力学》教材编写大纲(土建类、多学时)”的内容编写的,主要用作高等工业院校土建类各专业多学时类型材料力学课程的试用教材,也可作为其它专业的多学时类型材料力学课程的试用教材,还可供工程技术人员参考。

本书分上下两册出版,内容包括:绪论及基本概念,轴向拉伸和压缩,扭转,弯曲内力,弯曲应力,弯曲变形,简单超静定梁,应力、应变状态理论基础,强度理论,组合变形,压杆稳定,能量方法,实验应力分析基础,材料的力学性能的进一步研究,断裂力学基础等十四章,以及截面的几何性质、应力集中的概念和应力强度因子等一些附录。

高等学校试用教材

材 料 力 学

上 册

孙训方 方孝淑 关来泰 编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印装

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 12.375 字数 299,000

1979年4月第1版 1979年9月第1次印刷

印数 00,001—47,000

书号 15012·0117 定价 1.00 元

序

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基础课力学教材会议上讨论的土建类专业多学时类型的《材料力学》教材编写大纲编写的。同时,在内容上也适当地照顾到其它专业的需要,因此,只需将引例和例题略加增删或改动,并对个别专题的内容加以补充,本书也可用作其它专业多学时类型《材料力学》课程的试用教材。

在本书的基本部分中,较多地引用了一九六四——一九六五年孙训方、方孝淑、陆耀洪编写的《材料力学》一书的有关内容,但按上述编写大纲的要求和一些兄弟院校材料力学教师的意见,作了必要的增删和修改。例如删去了动荷载一章,而将其主要内容作为例题安排在第二、三、五等章中,这样既可使读者从基本变形形式开始就接触到动荷载问题,又能及时将基本变形形式中的能量概念用于计算,以加深对能量方法的理解。此外,在对问题的分析方面还作了必要的充实,并增加了较多的例题。在各章后附上了习题,习题答案在附录中给出。这样的安排都是为使本书更便于自学。

本书除了对基本变形形式下的内力分析、应力计算公式的推导及其适用的条件性,以及位移计算中的边界条件等特别给以重视外,还对稳定性的概念、临界力公式的推导、能量原理的基本概念和方法等都予以加强。对于单元体和应力状态、变形能、叠加原理等概念和方法则分散在有关各章中逐步引出概念,并通过例题、

习题加以应用，以收到反复巩固的功效。编者希望通过这样的处理，使材料力学中的主要内容能使读者切实学到手。断裂力学作为常规强度计算的补充，近年来有了很大的发展。本书用专章着重介绍了线弹性断裂力学的一些基本原理和简单的应用，这些都是断裂力学的重要基础。至于对线弹性断裂力学的进一步研究以及弹塑性断裂力学的内容，就只能由专门的课程来介绍了。

本书对于一些次要内容的处理办法是：在属于次要内容的章节前加上*号或将其安排在例题中，这样做可便于教师的取舍。由于材料力学内容较为丰富，专业要求又不尽相同，建议教师在使用本书时，根据专业的特点选用有关的章节进行教学。对于有些专业，限于学时的安排，也可以把主要精力放在基本部分上，而将专题部分作为选修的内容。

本书的字符和下标尽量保持与我国现行的有关手册和规范中所采用者一致。至于各种量的单位则主要以国际制单位为准，在少数插图中由于原始资料不便改动，仍保留了原用的公制单位。本书还附有一些主要常用量的公制单位与国际制单位的换算表，以便查用。

在本书编写过程中，西南交通大学、大连工学院和南京工学院三校的领导同志给予了大力支持。担任本教材主审的武汉水利电力学院栗一凡同志以及参加审稿会的武汉水利电力学院、成都科学技术大学、哈尔滨工业大学、华东水利学院、西安冶金建筑学院、江西工学院、重庆建筑工程学院、天津大学、同济大学、北京工业大学、太原工学院、清华大学、北京建筑工程学院和西南交通大学、大连工学院、南京工学院等院校的代表对本书的初稿提供了宝贵的意见。西南交通大学材料力学教研室奚绍中同志等对本书初稿特别是其中的例题及习题进行了校阅和修改，并提出了不少建设性的建议。三院校材料力学教研室的同志对本书的插图和例题、习题解答等方面都做了大量工作。这些对本书的定稿都起了很大

的作用,这里一并致谢。

限于编者的水平,本书一定存在不少缺点和不妥之处,希望广大教师和读者在使用本书后给我们提出宝贵的意见,以便今后改进。

目 录

编 者

一九七九年二月

1	.....	1-1-1
2	.....	2-1-1
3	.....	3-1-1
4	.....	4-1-1
5	.....	5-1-1
6	.....	6-1-1
7	.....	7-1-1
8	.....	8-1-1
9	.....	9-1-1
10	.....	10-1-1
11	.....	11-1-1
12	.....	12-1-1
13	.....	13-1-1
14	.....	14-1-1
15	.....	15-1-1
16	.....	16-1-1
17	.....	17-1-1
18	.....	18-1-1
19	.....	19-1-1
20	.....	20-1-1
21	.....	21-1-1
22	.....	22-1-1
23	.....	23-1-1
24	.....	24-1-1
25	.....	25-1-1
26	.....	26-1-1
27	.....	27-1-1
28	.....	28-1-1
29	.....	29-1-1
30	.....	30-1-1
31	.....	31-1-1
32	.....	32-1-1
33	.....	33-1-1
34	.....	34-1-1
35	.....	35-1-1
36	.....	36-1-1
37	.....	37-1-1
38	.....	38-1-1
39	.....	39-1-1
40	.....	40-1-1
41	.....	41-1-1
42	.....	42-1-1
43	.....	43-1-1
44	.....	44-1-1
45	.....	45-1-1
46	.....	46-1-1
47	.....	47-1-1
48	.....	48-1-1
49	.....	49-1-1
50	.....	50-1-1
51	.....	51-1-1
52	.....	52-1-1
53	.....	53-1-1
54	.....	54-1-1
55	.....	55-1-1
56	.....	56-1-1
57	.....	57-1-1
58	.....	58-1-1
59	.....	59-1-1
60	.....	60-1-1
61	.....	61-1-1
62	.....	62-1-1
63	.....	63-1-1
64	.....	64-1-1
65	.....	65-1-1
66	.....	66-1-1
67	.....	67-1-1
68	.....	68-1-1
69	.....	69-1-1
70	.....	70-1-1
71	.....	71-1-1
72	.....	72-1-1
73	.....	73-1-1
74	.....	74-1-1
75	.....	75-1-1
76	.....	76-1-1
77	.....	77-1-1
78	.....	78-1-1
79	.....	79-1-1
80	.....	80-1-1
81	.....	81-1-1
82	.....	82-1-1
83	.....	83-1-1
84	.....	84-1-1
85	.....	85-1-1
86	.....	86-1-1
87	.....	87-1-1
88	.....	88-1-1
89	.....	89-1-1
90	.....	90-1-1
91	.....	91-1-1
92	.....	92-1-1
93	.....	93-1-1
94	.....	94-1-1
95	.....	95-1-1
96	.....	96-1-1
97	.....	97-1-1
98	.....	98-1-1
99	.....	99-1-1
100	.....	100-1-1

016695

.. .

上册目录

第一章 绪论及基本概念	1
§ 1-1 材料力学的任务	1
§ 1-2 材料力学与生产实践间的关系	2
§ 1-3 可变形固体的性质及其基本假设	4
§ 1-4 材料力学主要研究对象(杆件)的几何特征	6
§ 1-5 杆件变形的基本形式	7
第二章 轴向拉伸和压缩	9
§ 2-1 轴向拉伸和压缩的概念及实例	9
§ 2-2 内力·截面法·轴力及轴力图	10
§ 2-3 横截面及斜截面上的应力	14
§ 2-4 拉(压)杆的变形·虎克定律	23
§ 2-5 拉(压)杆内的应变能	30
§ 2-6 材料在拉伸和压缩时的力学性能	36
§ 2-7 安全系数·容许应力·强度条件	52
§ 2-8 拉压超静定问题·处理超静定问题的方法	61
§ 2-9 拉(压)杆连接部分的剪切和挤压强度计算	72
习题	79
第三章 扭转	93
§ 3-1 概述	93
§ 3-2 薄壁圆筒的扭转	94
§ 3-3 等直圆杆在扭转时的应力	97
§ 3-4 等直圆杆在扭转时的变形·扭转超静定问题	109
§ 3-5 等直圆杆在扭转时的应变能	114
§ 3-6 传动轴的强度和刚度计算	118

§ 3-7	非圆截面等直杆在自由扭转时的应力和变形	127
*§ 3-8	开口和闭合薄壁截面杆在自由扭转时的应力和变形	131
*§ 3-9	考虑材料塑性时圆杆的极限扭矩	140
习题	.....	143
第四章	弯曲内力	153
§ 4-1	梁的平面弯曲概念及梁的计算简图	153
§ 4-2	梁的剪力和弯矩	158
§ 4-3	剪力方程和弯矩方程·剪力图和弯矩图	167
§ 4-4	弯矩、剪力与分布荷载集度间的关系及其应用	177
§ 4-5	按叠加原理作弯矩图	185
习题	.....	190
第五章	弯曲应力	198
§ 5-1	引言	198
§ 5-2	纯弯曲时梁横截面上的正应力	198
§ 5-3	纯弯曲理论在横力弯曲中的推广	205
§ 5-4	梁横截面上的剪应力	208
§ 5-5	梁的正应力和剪应力强度条件·梁的合理截面	220
§ 5-6	非对称截面梁的平面弯曲·开口薄壁截面的弯曲中心	234
*§ 5-7	约束扭转的概念	239
*§ 5-8	两种材料的组合梁	242
*§ 5-9	平面大曲率杆在纯弯曲时的正应力计算公式	247
§ 5-10	考虑材料塑性时梁的极限弯矩	252
习题	.....	256
第六章	梁弯曲时的位移·简单超静定梁	269
§ 6-1	概述	269
§ 6-2	梁的挠曲线近似微分方程及其积分	270
*§ 6-3	梁挠曲线的初参数方程	281
§ 6-4	计算梁的挠度及转角的共轭梁法	284
§ 6-5	按叠加原理计算梁的挠度及转角	294
§ 6-6	梁的刚度校核·提高梁的刚度的措施	298

§ 6-7	梁内的弯曲应变能	301
§ 6-8	简单超静定梁的解法	306
*§ 6-9	支座沉陷和温度变化对超静定梁的影响	311
	习题	318
附录 1.	截面的几何性质	324
§ 附 1-1	截面的面积矩和形心位置	324
§ 附 1-2	惯性矩和惯性积	328
§ 附 1-3	惯性矩和惯性积的平行移轴公式 · 组合截面的惯性矩和惯性积	331
§ 附 1-4	惯性矩和惯性积的转轴公式 · 截面的主惯性轴和主惯性矩	336
§ 附 1-5	计算惯性矩的近似方法	342
	习题	344
附录 2.	常用截面的几何性质计算公式	348
附录 3.	型钢规格表	350
附录 4.	简单荷载作用下梁的挠度和转角	366
	习题答案	370
	主要字符表	383
	主要常用量的公制单位与国际制单位换算表	386

第一章 绪论及基本概念

§ 1-1. 材料力学的任务

建筑物和机械通常都受到各种外力的作用,例如厂房外墙受到的风压力、建筑物受到的地震力、吊车梁承受的吊车和起吊物的重量、轧钢机受到钢坯变形时的阻力等,这种力和重量都是荷载^①。建筑物承受荷载而起骨架作用的部分称为结构,组成结构或机械的单个部分则称作构件或零件。

当结构或机械承受荷载或传递运动时,各构件或零件都必须能够正常地工作,这样才能保证整个结构或机械的正常工作。为此,首先要求构件在受荷载作用时不发生破坏。如机床主轴因荷载过大而断裂时,整个机床就无法使用。但只是不发生破坏,并不一定就能保证构件或整个结构的正常工作。例如吊车梁若因荷载过大而发生过度的变形,吊车也就不能正常行驶;又如机床主轴在超载时若发生过大的变形,则将影响机床的工作精度。此外,有一些构件在荷载作用下,其原有形状的平衡可能丧失稳定性。现以房屋的柱为例来加以说明:这类构件如果是细长的,则在压力超过一定限度后,就有可能显著地变弯;按照细长受压杆件的抽象模型,可将这种变弯的实际现象看作是它在其原有直线形状下的平衡丧失了稳定性,并简称为失稳(详见本书 § 10-1)。构件失稳的后果往往是严重的,例如上述的柱如果失稳,就可能使房屋倒塌。针对

^① 在材料力学中首先研究静荷载下的问题。静荷载指的是没有加速度或加速度可以忽略不计的荷载。

上述三种情况,对构件正常工作的要求可以归纳为如下三点:

(1) 在荷载作用下构件应不致于破坏,即应具有足够的强度;

(2) 在荷载作用下构件所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) 承受荷载作用时构件在其原有形状下的平衡应保持为稳定的平衡,也就是要满足稳定性的要求。

设计构件时,不但要满足上述强度、刚度和稳定性这三点要求,同时,还必须尽可能地合理选用材料和降低材料的消耗量,以节约资金或减轻构件的自身重量。前者往往要求多用材料,而后者则要求少用材料,两者之间是存在着矛盾的。材料力学的任务就在于力求合理地解决这种矛盾。在不断解决新矛盾的同时也就促进了材料力学的发展。

构件的强度、刚度和稳定性问题均与其所用材料的力学性能(主要指的是在外力作用下材料变形与所受外力之间的关系)有关,这些力学性能均需通过材料试验来测定。此外,也有些单靠现有理论解决不了的问题,需借助于实验来解决。因此,实验研究和理论分析同样重要,都是完成材料力学的任务所必需的手段。

§ 1-2. 材料力学与生产实践间的关系

“科学的发生与发展,一开始就是由生产决定的”^①。材料力学的发展正如其它科学一样,也是由生产的发展所推动的,同时它又反过来对生产实践起着重要的指导作用。

在封建社会及其以前,建筑物多以石料、木材以及冶炼粗糙的铸铁、铸铜等为主要建筑材料,同时,这些建筑物的工作条件也较简单,在设计它们时多凭经验并采用模仿的方法。但在古代建

^① 见恩格斯《自然辩证法》。

筑中也已体现出当时劳动人民根据生产实践所积累起来的经验，对构件受力特点及材料的力学性能有了初步认识，并能结合构件受力特点正确地使用材料。例如：在我国古代就已将一些砖石结构做成拱形，以充分发挥材料的抗压强度；用竹索做成悬索桥，以充分利用竹材的抗拉强度；此外，在木结构中也积累了不少制造梁、柱的经验，如对于矩形截面的木梁采用了截面高宽比为3:2，这事实上是符合材料力学基本原理的。

封建社会解体后，生产力得到了迅速发展。为了建造新的建筑物、车、船及机械等，单凭经验并采用模仿的方法就解决不了新提出的问题。材料力学也就在这种情况下逐渐形成为一门科学。这一时期的意大利科学家伽利略(G. Galileo)，为了解决建造船只和水闸所需梁的尺寸问题进行了一些实验，并在1638年首先提出了计算梁的强度所用的公式。虽然由于他用了刚体力学的方法而未考虑到梁受力后的变形这一重要因素，以致其结论并不正确，但他开辟了用实验和按理论方法计算构件的新途径，这在方法上仍然是有贡献的。后来，英国科学家虎克(R. Hooke)在1678年发表了他根据实验观察所总结出来的重要物理定律——力与变形成正比，从此以后，材料力学在过去生产实践中所积累的丰富经验的基础上，开始有了新的发展。

随着生产的发展，以及随着铁路车辆、飞机、新型建筑物和金属切削机床的发明和使用，提出了减轻构件自重、减少材料消耗量的要求。为此必须提高材料的强度，这就推动了冶金工业的发展，使高强度的金属例如钢、铝合金等材料逐渐成为主要的工程材料，从而使构件为了符合其强度要求所需要的截面尺寸有可能减小。然而，由于采用了细长的构件，荷载作用下的变形就显著地增大。因此，保证构件的刚度即防止其变形超过工程上所能允许的范围，就成为在计算中必须加以考虑的另一个方面。此外，由于细长构件在受压时，又出现了在其原有形状下的平衡丧失了稳定性的问

题,所以对构件进行稳定性的计算,也随着这种构件的采用而成为理论计算中所不可忽视的又一个方面。由此可见,对于在荷载作用下的构件需要进行强度、刚度和稳定性的计算,是随着生产的发展在实践中不断出现新问题的情况下而逐渐提出的。

生产的进一步发展又出现了更多的新问题,例如很多构件需要在随时间而交替变化的荷载作用下,或长期在高温环境中工作等等。对于在这些情况下工作的构件进行强度、刚度和稳定性的计算时,就得考虑更多的影响因素。此外,随着超高强度钢的应用,又出现了由于结构或构件中存在着漏检的初始裂纹而发生意外断裂的事故,为解决这类问题,近年来发展了断裂力学这一个分支。

由上述可知,材料力学所要解决的问题的范围是随着生产发展而日益扩大。另一方面,在生产实践中也提供了大量成功的经验和失败的教训,同时在实验室内进行了大量科学实验,也不断积累着有关材料力学方面丰富的实验资料,这些都是有助于材料力学发展的因素。生产的发展就是这样全面地推动和有力地支持着材料力学的发展。

从另一方面来说,材料力学的发展对生产实践也起着重要的指导作用,它为构件的计算提供了简便实用的方法,既保证了构件在各种情况下能够正常地工作,又能合理地使用材料。

§ 1-3. 可变形固体的性质及其基本假设

制造结构或机械的构件或零件所用的材料,虽然其物质结构和性质是多种多样的,但却具有一个共同的特点,即它们都是固体,而且在荷载作用下会发生变形——包括物体尺寸的改变和形状的改变。因此,这些材料统称为可变形固体。

对于用可变形固体材料做成的构件进行强度、刚度或稳定性计算时,为了使问题得到简化,常须略去材料的次要性质,并根据其主要性质作出假设,将它们抽象为一种理想模型,然后进行理论

分析。下面是对可变形固体所作的两个基本假设。

(一) 连续性假设 即认为物体在其整个体积内都毫无空隙地充满了物质,其结构是密实的。实际的可变形固体,从其物质结构上来说,虽然均具有不同程度的空隙,然而,这些空隙的大小和构件的尺寸相比均极微小,因而可将它们忽略不计,而认为物体的结构是密实的。

(二) 均匀性假设 即认为从物体内取出的任一部分,不论其体积大小如何,其力学性能都是完全一样的。实际的可变形固体,其基本组成部分(例如金属的晶粒)的性能都有不同程度的差异。但由于基本组成部分的大小和构件的尺寸相比极微小,它们在构件中的排列也是不规则的,所以,物体的力学性能并不反映其某一个组成部分的性能,而是反映所有组成部分性能的统计平均量。因而可认为物体的力学性能是均匀的。

实践证明,在工程计算所要求的精确度范围内,将实际材料抽象为均匀和连续的可变形固体,所得到的计算结果是能令人满意的。除了上述两个基本假设外,对材料力学中所涉及的材料性能还可作各向同性的假设,即认为材料沿各方向的力学性能均相同。实际上有些材料,例如木材和复合材料等,沿各方向的力学性能显然是不同的。但另外一些材料,例如玻璃等,沿其各方向的力学性能则完全相同。后一种材料即称为各向同性的材料。至于工程上常用的金属,就其每一个晶粒来讲,其力学性能是具有方向性的,但由于构件中所包含晶粒的数量极多,而且晶粒的排列也完全没有规则,所以,按统计学的观点也可以将金属假设为各向同性的材料。材料力学中所研究的问题将局限于各向同性的可变形固体。将这样得到的结论用于某些具有方向性的材料,有时也可以得到较满意的近似解答。

材料力学中所研究的构件在承受荷载作用时,其变形与构件的原始尺寸相比通常甚小,可以忽略不计,所以,在研究构件的平

衡和运动以及其内部受力和变形等问题时,均可按构件的原始尺寸和形状进行计算。这种变形微小及按原始尺寸和形状进行计算的概念,在材料力学中将经常用到。与此相反,有些构件在受力变形后,必须按其变形后的形状来计算,本书第十章所讨论的压杆稳定就属于这类问题。至于大变形问题的详细讨论,则超出了本书所涉及的范围。

工程上所用的材料,在荷载作用下均将发生变形。当荷载不超过一定的范围时,绝大多数的材料在撤去荷载后均可恢复原状。但当荷载过大时,则在荷载撤去后只能部分地复原而残留下一部分不能消失的变形。在撤去荷载后能完全消失的那一部分变形称为弹性变形,不能消失而残留下来的那一部分变形则称为塑性变形。例如取一段直的钢丝,用手将它弯成一个圆弧,若圆弧的曲率不大,则放松后,钢丝又会变直,这种变形就是弹性变形;若弯成的圆弧曲率过大,在放松后,弧形钢丝的曲率虽然会减小些,但却不能再变直了,残留下来的那一部分变形就是塑性变形。对每一种材料来讲,在一定的受力范围内,其变形完全是弹性的。多数构件在正常工作条件下均要求其材料只发生弹性变形。所以在材料力学中所研究的大部分问题多局限在弹性变形范围内。

概括起来讲,在材料力学中是把实际材料看作均匀、连续、各向同性的可变形固体,且在大多数场合下局限在按构件的原始尺寸和形状并在弹性变形范围内进行研究。

§ 1-4. 材料力学主要研究对象 (杆件) 的几何特征

材料力学所研究的主要构件从几何上多抽象为杆,而且大多数抽象为直杆。直杆是纵向(长度方向)尺寸远比横向(垂直于长度方向)尺寸要大得多的物体。梁、柱和传动轴等多抽象为直杆。

直杆有两个主要的几何因素,即横截面和轴线,前者指的是直

杆沿垂直于其长度方向的截面,后者则为所有横截面形心的连线(图 1-1, *a*)。横截面和轴线是互相垂直的。在材料力学中所研究的直杆多数是等截面的,通常简称为等直杆(图 1-1, *a*)。

对于等截面的曲杆,它的主要几何因素仍是横截面和轴线。前者指的是曲杆沿垂直于其弧长方向的截面,

后者则为所有横截面形心的连线(图 1-1, *b*)。曲杆的轴线与横截面也是相互垂直的(图 1-1, *b*)。

横截面大小不同的杆称为变截面杆。

等直杆的计算原理一般也可近似地用于曲率很小的曲杆和横截面无急剧变化的变截面杆。

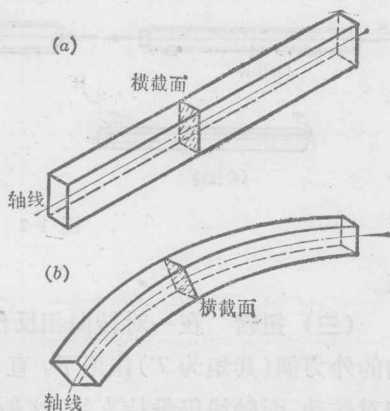


图 1-1

§ 1-5. 杆件变形的基本形式

作用在杆上的外力是多种多样的,因此,杆的变形也是各种各样的。不过这些变形不外乎是以下四种基本变形形式之一,或者是几种基本变形形式的组合。

(一) 轴向拉伸或轴向压缩 在一对作用线与杆轴线重合的外力 P 作用下,直杆的主要变形是长度的改变。这种变形形式称为轴向拉伸(图 1-2, *a*)或轴向压缩(图 1-2, *b*)。简单桁架在荷载作用下,有些杆件发生轴向拉伸,有些杆件发生轴向压缩。

(二) 剪切 在一对相距很近的大小相同指向相反的横向外力 P 作用下,直杆的主要变形是横截面沿外力作用方向发生错动(图 1-2, *e*)。这种变形形式称为剪切,它多与其他变形形式共同存

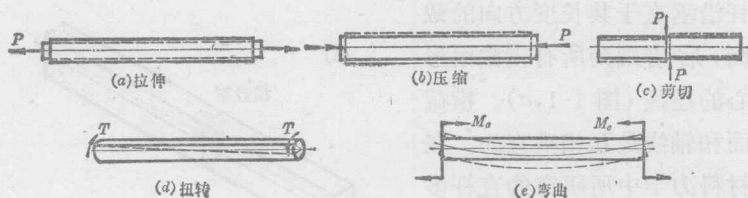


图 1-2

在。

(三) 扭转 在一对转向相反作用在垂直于杆轴线的两平面内的外力偶(其矩为 T)作用下, 直杆的相邻横截面 将绕轴线发生相对转动, 而轴线仍维持直线, 这种变形形式 称为 扭转 (图 1-2, d)。机械中的传动轴的主要变形就包括扭转在内。

(四) 弯曲 在一对转向相反作用在杆的纵向平面(即包含杆轴线在内的平面)内的外力偶(其矩为 M_e)作用下, 直杆的相邻两横截面将绕垂直于杆轴线的轴发生相对转动, 变形后的杆轴线将弯成曲线, 这种变形形式称为纯弯曲(图 1-2, e)。梁在横向力作用下其变形将是纯弯曲与剪切的组合, 通常称为横力弯曲。传动轴往往是扭转与横力弯曲的组合。

工程实践中常用构件在荷载作用下的变形多为上述几种基本变形形式的组合, 纯属一种变形形式者极少见。但若以某一种基本变形形式为主, 其它则属于次要变形者, 就按这一种基本变形形式计算。若几种变形形式都非次要变形, 则属于组合变形问题, 对于这类问题可分别按每一种基本变形形式进行计算, 再将其计算结果加以组合, 详见第九章。