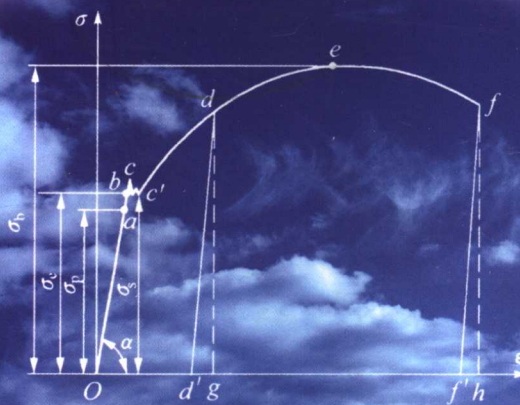


全国高等农业院校教材
全国高等农业院校教学指导委员会审定

材料力学

张良成 主编



中国农业出版社

TB301
119

全国高等农业院校教材
全国高等农业院校教学指导委员会审定

材 料 力 学

张良成 主编

中 国 农 业 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

材料力学 / 张良成主编. —北京: 中国农业出版社,
2003.7

全国高等农业院校教材

ISBN 7-109-08212-1

I. 材... II. 张... III. 材料力学-高等学校-教材 IV. TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 059147 号

中国农业出版社出版
(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)
(邮政编码 100026)

出版人: 傅玉祥
责任编辑 彭明喜

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行
2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×960mm 1/16 印张: 24.25

字数: 433 千字

定价: 31.60 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

前 言

本教材为全国高等农业院校“十五”规划教材,按照培养和造就“厚基础、强能力、高素质、广适应”创造性复合型人才的要求,本教材以培养学生独立思考和创新能力为基本出发点,着重内容体系的改革,力求做到“体系新、内容新、方法新”,编写过程中既注意学习、吸收有关院校教学内容和课程体系改革成果,又尽量反映编者多年来教学所积累的经验,内容的选取和组织,按内力、应力和强度、变形和刚度、应力状态及强度理论、组合变形、压杆稳定的顺序,体现了力学知识的融会贯通和整合优化,既简练了内容,又强化了力学知识的完整性和系统性。为增加教材的适用范围,选编了能量法、薄壁杆件的剪应力、动载荷和交变应力四章,以满足不同学时、不同专业的要求。

参加本书编写工作的有:山东农业大学刘福胜(第一章、附录 I)、张良成(第二章)、山西农业大学郭玉明(第三章)、中国农业大学付志一(第四、八章)、西北农林科技大学卢博友(第五章)、内蒙古农业大学申向东(第六章)、李晓丽(第九章)、甘肃农业大学贾生海(第七章)、福建农林大学翁红林、周宝焜(第十章)、河南农业大学陈合顺(第十一章)。全书由张良成任主编,付志一、郭玉明、申向东、卢博友任副主编,由山东农业大学林成厚教授主审。

本书的编写和出版,得到中国农业出版社和参编院校的大力支持和帮助,谨此,编者诚挚致谢。

因编者水平有限,书中肯定会有不少差错和疏漏,敬请读者批评指正。

编 者

2003 年 6 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
§ 1.1 材料力学的任务及研究对象	1
§ 1.2 变形固体及其基本假设	3
§ 1.3 杆件变形的基本形式	4
§ 1.4 材料力学的发展概况	5
第二章 杆件的内力和内力图	8
§ 2.1 内力与内力分量	8
§ 2.2 内力与外力的关系	9
§ 2.3 内力与内力图	10
小结	36
思考题	37
习题	38
第三章 杆件的应力和强度	44
§ 3.1 应力、应变及其相互关系	44
§ 3.2 材料的力学性质	47
§ 3.3 轴向拉压杆的应力与强度	58
§ 3.4 连接构件的实用计算	66
§ 3.5 扭转杆件的应力和强度	70
§ 3.6 梁的应力与强度	82
小结	102
思考题	104
习题	105
第四章 杆件的变形和刚度	118
§ 4.1 杆件的拉压变形	118
§ 4.2 杆件的扭转变形和刚度	125
§ 4.3 弯曲变形	131
小结	141

思考题	142
习题	142
第五章 应力状态与强度理论	147
§ 5.1 应力状态的概念	147
§ 5.2 分析平面应力状态的方法	150
§ 5.3 空间应力状态简介	160
§ 5.4 广义虎克定律	164
§ 5.5 强度理论及其应用	169
小结	178
思考题	181
习题	182
第六章 组合变形分析	188
§ 6.1 组合变形的概念及分析方法	188
§ 6.2 斜弯曲	189
§ 6.3 拉伸(压缩)与弯曲的组合	193
§ 6.4 偏心压缩(拉伸) 截面核心	197
§ 6.5 扭转与弯曲的组合	202
小结	208
思考题	209
习题	209
第七章 压杆稳定	216
§ 7.1 压杆稳定的概念	216
§ 7.2 细长压杆的临界压力 欧拉公式	219
§ 7.3 压杆的临界应力 临界应力总图	226
§ 7.4 压杆的稳定计算 压杆的合理截面	230
小结	237
思考题	238
习题	239
第八章 能量法与超静定结构	243
§ 8.1 能量法	243
§ 8.2 简单超静定结构	253
小结	266
思考题	268
习题	268

第九章 薄壁杆件的剪应力	273
§ 9.1 薄壁杆件的基本特点	273
§ 9.2 薄壁杆件的扭转剪应力	275
§ 9.3 开口薄壁杆件的弯曲剪应力 弯曲中心	283
小结	292
思考题	293
习题	293
第十章 动载荷	296
§ 10.1 概述	296
§ 10.2 惯性力问题	296
§ 10.3 构件受冲击时的应力和变形	300
§ 10.4 提高构件抗冲击的措施	305
§ 10.5 冲击韧度	306
小结	308
思考题	308
习题	309
第十一章 交变应力	313
§ 11.1 交变应力的基本概念	313
§ 11.2 疲劳失效	315
§ 11.3 材料的持久极限	317
§ 11.4 影响持久极限的因素	319
§ 11.5 疲劳强度的校核	323
§ 11.6 变幅交变应力	331
§ 11.7 提高构件疲劳强度的措施	333
小结	333
思考题	334
习题	334
附录 I 截面的几何性质	339
§ I.1 截面的静矩和形心	339
§ I.2 截面的惯性矩、惯性积及极惯性矩	342
§ I.3 平行移轴公式及组合截面的惯性矩和 惯性积	345
§ I.4 形心主轴和形心主惯性矩	348
小结	352

思考题	352
习题	353
附录 II 型钢表	356
部分习题参考答案	366
主要参考文献	376

第一章 绪 论

§ 1.1 材料力学的任务及研究对象

§ 1.1.1 材料力学(mechanics of materials)的任务

阐述材料力学的任务,需要联系到建筑物和机械中的一些工程术语,诸如载荷(load)、结构(structure)、构件(member)、杆件(member)等。作用在建筑物和机械上的外力通常称为载荷或荷载。例如,厂房外墙受到的风力、水坝受到的水压力,车床主轴受到的切削力,以及物体的自重等都是载荷。建筑物承受载荷而起骨架作用的部分称为结构。例如,由许多杆件组成的屋架结构,由柱、屋架和基础组成的排架结构(图 1-1a),现浇混凝土梁板楼盖结构,框架结构,等等。组成结构或机械的单个部分称为构件。杆件是构件的一种。例如,厂房中的吊车梁、柱、基础(图 1-1a),挖土机中的活塞杆、连杆、铲臂(图 1-2a)等都是构件。

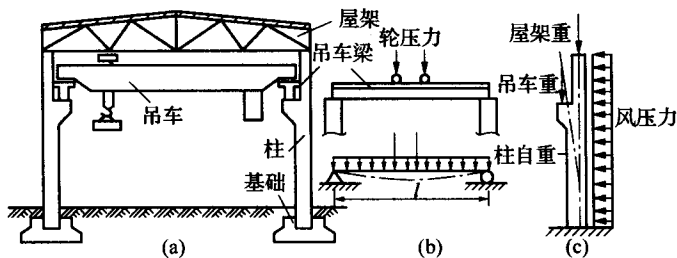


图 1-1

为了说明材料力学的任务,我们首先分析吊车梁和柱在外力作用下可能出现的问题。梁在自重(恒载)、吊车轮压力(活载)和支座压力的作用下要变弯(图 1-1b),柱在屋架重、吊车重、自重、风力(活载)和支座反作用力下要变短和变弯(图 1-1c),构件的形状和尺寸都要变化,即发生变形。实践表明,外力过大或者梁、柱截面尺寸过小,变形也愈大,梁、柱可能发生折断或者裂开而破坏。即使不会破坏,但变形过大也会严重影响吊车的平稳行使和柱的正常工作,这都是不允许的。

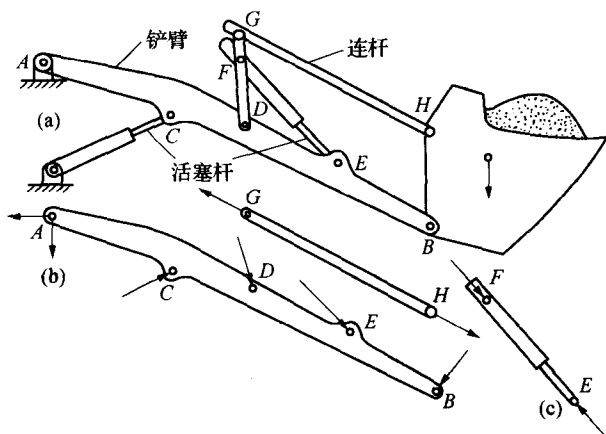


图 1-2

再如,挖土机的铲臂、连杆,其受力简图如 1-2b、c 所示,当载荷过大或构件过于细长时,也可能发生破坏。

还有工程中常发现活塞杆、桁架的受压各杆、细长的柱等,由于过于细长,在压力不太大的情况下,可能会突然失去原来的直线平衡形式而变弯,这种现象在力学上称为丧失稳定性或失稳,这也是不允许的。

从上面的变形分析可见,在力的作用下,构件必须具备足够的承受载荷的能力(承载能力),才能保证构件和整个机构或机械安全可靠地工作。构件的承载能力通常有强度、刚度和稳定性三个方面的要求。

(1) 强度(strength): 是指构件或零部件在确定的外力作用下,不发生破裂或过量塑性变形。

(2) 刚度(stiffness): 是指构件或零部件在确定的外力作用下,其弹性变形或位移不超过工程允许的范围。

(3) 稳定性(stability): 是指构件或零部件在某种受力形式(例如轴向压力)下,其形式不会发生突然转变。

要是构件满足上述三个方面的要求,似乎只要使构件的尺寸做得粗厚些并选用优质材料来制作就可以了,但是这样做又可能造成材料的浪费和结构的笨重,有时也不美观,可见安全可靠与经济、适用两者之间常常是矛盾的。材料力学的任务就是为构件的强度、刚度、稳定性要求提供必要的理论基础和计算方法,使设计的构件在形状、尺寸和选用的材料诸方面既满足承载能力的要求又经济实用。

构件的强度、刚度、稳定性问题均与所选材料的力学性质有关,材料的力学性质指的是材料在力的作用下抵抗变形和破坏等方面表现出来的性能,又称机

械性质。他是通过材料实验来测定的。在学习这门课程的过程中,要通过实验来了解一些典型材料的力学性质和验证部分理论结果,今后遇到比较复杂的工程问题,也要借助实验来检验其承载能力。因此,实验是完成材料力学任务所必须的重要手段。

§ 1.1.2 材料力学的研究对象

工程构件的形状是多种多样的,根据几何形状和尺寸的不同,通常有杆、板(楼板)、壳、块体(如水坝)之分。但杆件则是最常见的,所谓杆件是指它在某一方向的尺寸比其余两个方向尺寸大得多的构件。房屋中的梁、柱、屋架各杆,机械中的活塞杆、连杆、传动轴等都可看做是杆件。

杆件有几个重要的特征:

- (1) 横截面(cross section): 是与杆件长度方向垂直的截面。
- (2) 轴线(axis): 是所有横截面形心的连线,轴线与横截面垂直。

杆件可分为直杆和曲杆,按截面的变化情况,杆件又可以分为等截面杆件和变截面杆件(图 1-3)。

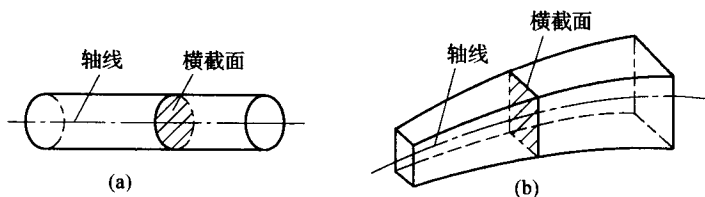


图 1-3

材料力学的研究对象主要是等截面直杆,简称等直杆。材料力学有时候也涉及一些板、壳、块体。但都是一些简单的力学问题,这些构件的研究属于“板壳理论”和“弹性力学”的问题。

§ 1.2 变形固体及其基本假设

在理论力学中,研究物体在外力作用下的平衡和运动规律,物体的微小变形是个次要因素,因而把物体抽象成刚体。但在材料力学中,研究物体的强度、刚度和稳定性问题,变形则成为一个主要因素。而且刚度要求本身就需要考察变形,所以,材料力学必须把物体看做可变形的固体,简称变形固体。

工程上使用的固体材料是多种多样的,而且其微观结构和力学性质也非常

复杂,为了使问题得到简化,通常对变形固体做如下基本假设:

1. 均匀连续性假设 此假设认为变形固体的材料是由密集程度相同的同一物质所组成,而且整个体积内都毫无空隙的充满着物质。例如,混凝土材料的各部分认为是均匀密实的,充满着碎石、砂和水泥结成的胶凝物。根据这一假设,从构件中截取一部分来分析、实验,结果可推广到整个物体上去。而且构件内有关力学量可以表示为坐标的连续函数。

2. 各向同性假设 认为材料沿各个方向的力学性质都是相同的,即材料的力学性质与方位无关。但是实际上并非完全如此,例如金属材料的单个晶粒在不同方向上其力学性质并不相同,而且各个晶粒之间也不是都均匀连续的。但对整个构件和构件的一部分来说,从统计学的观点可认为是均匀连续、各向同性的。根据各向同性假设,当获得了材料任何一个方向的力学性质之后,就可以将其结果用于其他方向。但是此假设并不适用于所有的材料,例如木材、纤维、增强复合材料等,其力学性质是各向异性的。

3. 弹性小变形假设 固体材料在载荷作用下所发生的变形可分为弹性变形和塑性变形。载荷卸除后能完全消失的变形称为弹性变形,不能消失的变形称为塑性变形。一般地说,当载荷不超过一定的范围时,材料将只产生弹性变形。弹性变形可能很小也可能相当大,在材料力学中通常做出小变形假设,即认为物体的变形与构件的尺寸相比甚为微小。工程实际中大多数的构件,在载荷作用下的变形符合小变形假设,因此在利用平衡条件求支座反作用力、构件内力时可以忽略变形,仍用原来尺寸,从而使得计算得到简化。

综上所述,本书讨论由均匀连续、各向同性材料组成的杆件,在弹性范围内小变形条件下的强度、刚度和稳定性问题。

§ 1.3 杆件变形的基本形式

杆件由于外力作用方式和支撑状况的不同,变形也是多种多样的。但通常可归结为下列四种变形形式:

1. 轴向拉伸或压缩 (tension and compression) 这种变形是由作用线与杆件轴线相重合的一对大小相等、方向相反的外力引起的,表现为杆件沿轴线的伸长或缩短。

2. 剪切 (shear) 这种变形是作用在杆件上的一对大小相等、方向相反、相距很近的横向力引起的,表现为杆件的横截面沿力的方向发生相对错动。

3. 扭转 (torsion) 这种变形是作用在杆件两端的两个大小相等、转向相反且作用平面垂直于杆轴线的力偶引起的。表现为杆件的横截面绕轴线发生相对转动。

4. 弯曲 (bend) 这种变形是由一对转向相反,作用在包含杆轴线的纵向平面的力偶引起的或由垂直于杆轴的横向力引起的,表现为杆件轴线变成曲线。图 1-4e 是纯弯曲的情况。

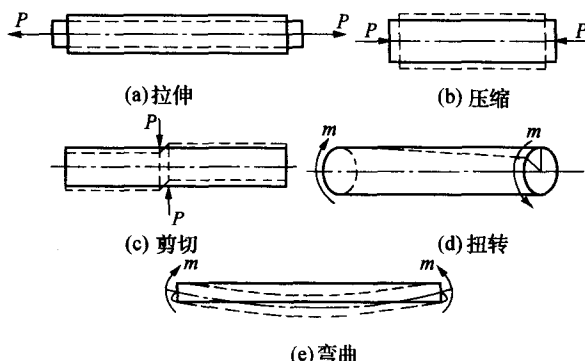


图 1-4

实际构件的变形,可能只是某一种基本变形,也可能是几种基本变形同时存在的组合变形。例如屋架的各杆,机械中的连杆、活塞杆就是轴向拉伸或者压缩;铰链支座的受力销钉、剪切机剪切板都是剪切;机械的传动轴在扭转的同时也有弯曲;房屋中的梁主要发生弯曲;图 1-1 中的柱是压缩—弯曲两种变形的组合,等等。以后各章先讨论基本变形,然后讨论组合变形。剪切变形通常在拉、压杆的连接构件中出现,本书放在拉伸和压缩一章中讨论。

§ 1.4 材料力学的发展概况

材料力学和其他学科一样,是由于生产实践的推动逐步地发展和丰富起来的,是人们与大自然斗争的必然产物。

人类自从用双手进行劳动以来,就在不断地制造、建筑、改进生活和生产所需要的各种工具、机械、房屋、舟车、堤坝等。这就不能不使用各种材料,最初是使用天然材料,如石、竹、木等,后来是使用人工制造的材料,如砖、铜、铁、钢、水泥、塑料等。在长期的生产活动过程中,人们逐渐地认识了材料的性能,并掌握了对它们的使用规律。

我国是世界上文明发达最早的国家之一。勤劳智慧的人民,在很早的年代里,就对合理地利用各种材料的力学性能,制造、修建各种器械和建筑物具有比较丰富的知识。例如,在汉代,我们的祖先就开始运用铁轴。三国时的马钧开始运用了齿轮。很早以前,我们就有了闻名于世的长城、大运河等伟大工程。我国

木结构的建造方法在 3 500 年前就已经形成,我国建筑上所特有的斗拱结构,在春秋战国时代的铜器上已经可以看到其图案。特别值得指出的是,至今尚完整的河北赵州单跨石拱桥,是由隋代杰出的工匠李春设计建造的。桥长 50 多 m,桥面宽 9 m,主拱半径为 25 m,建造时,就地取材采用了当地盛产的质地坚硬的青白色石灰石,根据石料耐压不耐拉的特性,并考虑到便于宣泄洪水、减轻桥身自重、降低桥高、便利交通等方面的要求,合理地采取了拱上背拱的敞肩平拱形拱桥结构。它比世界上相同类型的石拱桥要早 1 200 多年,在构造处理和施工方法上也有许多创造性的合理措施。利用抗拉性能较好的材料建造悬桥,在我国也是很早就开始了的。例如:在我国盛产竹子的南方有竹索桥的发明,四川灌县都江堰上跨过岷江的一座长达 320 m 的竹索桥就是典型的例子。红军长征时强渡过的大渡河泸定桥,是在 1696 年(清康熙四十五年)建造的,是世界上第一座长达 100 m 的铁索桥。

总的说来,我国人民对有关材料强度的基本规律,以及石、铁、竹、木等材料的力学性质的合理利用,从第二世纪开始就已有所认识,直到 14 世纪,在这些方面的成就都居于世界前列。但由于封建制度在我国的长期延续,使得生产一直停滞不前,人民群众的智慧和创造力未能得到很好的发挥,故关于材料力学方面的知识也就一直停留在经验阶段,没有多大提高。与此相反,14 世纪以后,在欧洲,由于社会经济基础的变革,生产发展大大推动了材料力学知识的发展,并取得了很大进步。

材料力学作为一门正式的学科,一般认为是意大利科学家伽利略(G. Galileo, 1564—1642)开始的。当时意大利正处在封建社会解体、商业资本勃兴的时代,海外贸易的活跃、采矿冶金工业的萌芽和发展等新的经济情况,提出了一系列新的技术问题。例如,为了满足海内外贸易的要求,就需要增大船舶的吨位、修建水闸、改进内河交通等等。伽利略正是为了解决建造船只和水闸闸门需要的梁的问题,一方面总结了前人的经验,一方面进行了刻苦的钻研,通过计算和实验,初步研究了梁及其他杆件的截面尺寸与其所能承担的荷载之间的关系。并在 1638 年把他的研究成果写在《关于两种新科学的叙述和数学证明》一书内正式发表出来,使他成为第一个提出强度计算概念的科学家,并在科学研究中开辟了一个新的领域。从此以后,关于结构物和构件的设计工作就不再是单凭经验,而是在科学理论的指导下进行了。

作为材料力学物理基础的力与变形之间的关系,是由英国科学家虎克(R. Hooke, 1635—1703)通过对一系列实验资料的总结于 1678 年提出的。这就是著名的虎克定律。

由于工业发展的推动,材料力学在 18 世纪获得了很大的发展。俄国彼得堡

科学院院士欧拉(L. Euler, 1707—1783)研究了受压杆的稳定理论;俄国大科学家罗蒙诺索夫(M. X. ЛОМОНОСОВ, 1711—1765)开始用实验的方法研究材料的力学性质。法国工程师库伦(C. A. Coulomb, 1736—1806)对弯曲和扭转等问题做了理论及实验研究,获得了梁的正应力和圆轴扭转剪应力的正确结果。

在19世纪中,由于铁路的兴建,大大推动了材料力学向各个新的方向发展。交变应力下的强度问题,是因机车的轴不断损坏而引起研究的。受压杆的弹性稳定性的研究,是由于在铁路钢桥中要用到细长的压杆而被重视的。当时还曾因对稳定问题的认识不足发生过一系列桥梁倒塌的严重事故。由于运输工具的速度不断提高,车辆常以一定的速度通过桥梁,于是又促使人们对动荷载、振动、冲击等问题进行了研究。在以上这些研究工作中,实验也占有重要地位。例如:交变应力的强度计算,完全是以实验为基础的;压杆的稳定问题,也曾依靠实验才澄清了对有关理论的争论。就在这个时期,各国都相继建立了规模巨大的实验室。到19世纪的后半期,在船舶、蒸气锅炉、火车机车等的制造中,广泛采用了薄壁结构,又促使人们开始对这方面的研究。但限于当时的生产水平和一些数学知识的不足,薄壁理论没有能得到充分的发展。

在20世纪中,航空工业的发展又大大地推动了材料力学的研究。由于飞机的重量受到限制,促进了对轻型薄壳结构的研究。由于喷气发动机在高温下工作,材料在高温下力学问题,就成为一个新的研究领域。近年来由于人造卫星和宇宙火箭等的发展,又促使材料在高温下强度问题的研究前进了一大步。动荷载的问题在20世纪中有更多的研究。运用光测弹性力学及电测技术等实验方法研究构件的强度问题,也得到了广泛地研究和应用。在现代工程建设中,由于要求更经济地使用材料,促使材料力学的研究范围逐渐扩大到弹性范围以外。此外,随着高强度钢的应用,出现了不少由于构件中存在着初始裂纹而发生的低应力脆断事故,为了解决这类问题,又促进了对带裂纹的材料和结构的强度及裂纹扩展规律的研究。

如上所述,我们可以清楚地看出,材料力学之所以能发展,和其他学科一样,都是由于生产实践的推动,古今中外莫不如此。当然,科学发展以后又将促进生产的更大提高。当前,我们正在为把我国建成为农业、工业、国防和科学技术现代化的伟大社会主义强国而努力,我们深信,继承我们祖先勤劳智慧的传统,发挥社会主义制度的优越性,我们一定能使材料力学放射出更加绚丽的光彩!

第二章 杆件的內力和內力图

由前一章可知,对构件进行强度、刚度和稳定性分析是材料力学的基本任务,而强度、刚度和稳定性直接与构件的內力相关,本章首先建立杆件內力的概念,在此基础上研究杆件横截面上的內力分量、计算方法和沿杆轴线的变化规律,本章内容是进行材料力学各项计算的基础。

§ 2.1 內力与內力分量

物体在外力或其他因素(例如温度变化)作用下将产生变形,体内各点发生相对位移,从而产生抵抗变形的相互作用力,即內力(internal forces)。对于杆件,最有意义的是横截面上的分布內力。根据力系简化和平衡的理论,横截面上的分布內力可以向其形心简化。一般可以得到一个力 F'_R 和一个力偶 M ,二者分别称为內力主矢(resultant vector of internal forces)和內力主矩(principal moment of internal forces),如图 2-1a。

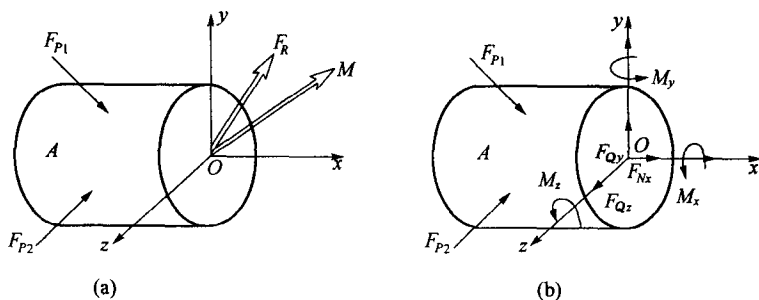


图 2-1 內力和內力分量

工程上最有意义的是主矢和主矩在选定坐标方向的分量,即內力分量(components of internal forces),如图 2-1b 所示。图中, x 轴沿杆轴方向, y 轴和 z 轴为横截面内过形心的相互垂直的轴,将主矢和主矩沿直角坐标轴分解,得內力分量如下:

轴力(normal force) F_{N_x} 或 F_N : 內力主矢 F'_R 沿杆轴线 x 方向的分量,垂直于截面,它使杆件产生轴向拉伸或轴向压缩变形,称为轴力,用符号 F_N 表示。

剪力(shearing force) F_{Q_y} 和 F_{Q_z} : 內力主矢 F'_R 在 y 轴、 z 轴上的分量,二者位于横截面內,它们的作用使截面分别产生沿 y 轴方向和 z 轴方向的相对错动,这种相对错动变形称为剪切变形,故称 F_{Q_y} 和 F_{Q_z} 为剪力。

扭矩(torsional moment) M_x : 內力主矩 M 沿杆轴线 x 方向的分量,使杆件横截面产生绕杆轴线的相对转动变形,称 M_x 为扭矩。

弯矩(bending moment) M_y 和 M_z : 內力主矩 M 沿 y 方向和 z 方向的分量,分别使杆横截面产生绕杆 y 轴和 z 轴的转动,使杆件产生弯曲变形,分别称 M_y 和 M_z 为对 y 轴和 z 轴的弯矩。

§ 2.2 內力与外力的关系

1. 弹性体的平衡原理 弹性杆件在外力作用下若保持平衡,则从其上截取的任意部分也必然平衡。前者称为整体平衡,后者称为局部平衡。所谓整体是指整个杆件;所谓局部是指用一截面将杆件截成的两部分中的任意一部分;两相距无穷小截面所截出的一微段;围绕某一点截取的某种微元或微元的局部,等等。这种整体平衡与局部平衡的关系,不仅适用于弹性杆件,而且适用于所有弹性体,因而可称为弹性体平衡原理(equilibrium principle for elastic body)。

2. 截面法 图 2-2a 所示代表某一受力物体,欲求某一截面內力分量的大小,可设想用一平面把物体沿该截面切开,取其中任意部分为研究对象,由弹性体平衡原理可知,此研究对象在该部分原外力及截开面上內力的共同作用下,应处于平衡状态,如图 2-2b 所示。利用平衡条件即可求得该截面上的各內力分量。这种求內力的方法称为截面法(method of section)。其求解步骤为:

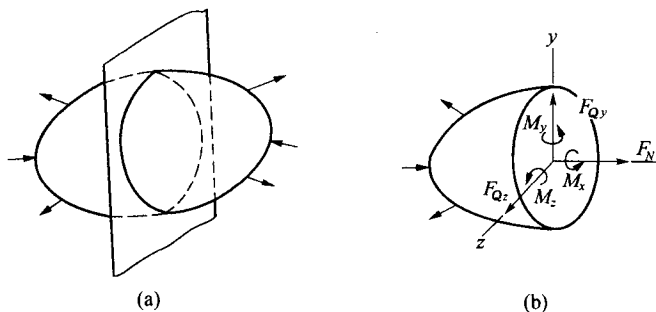


图 2-2 截面法

(1) 截开: 假想在需求內力截面处将物体截成两部分,取任一部分为研究