

应用技术型高等教育“十三五”精品规划教材

CAILIAO LIXUE

材料力学

(第二版)

主 编 ◎ 胡庆泉 高曦光

副主编 ◎ 侯善芹 杨尚阳 崔 泽 李 琳



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

应用技术型高等教育“十三五”精品规划教材

材 料 力 学

(第二版)

主 编 胡庆泉 高曦光

副主编 侯善芹 杨尚阳 崔 泽 李 琳



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北 京 ·

内 容 提 要

本教材是根据高等学校理工科非力学专业《材料力学课程教学基本要求》，结合创建应用型本科院校并依据“材料力学”课程教学大纲的内容和要求编写的。

本书共 12 章，包括：绪论、轴向拉伸与压缩、剪切、扭转、弯曲内力、弯曲应力、弯曲变形、应力状态分析和强度理论、组合变形、压杆稳定、能量法、动载荷及交变应力等，另设有附录 I、II。本书重视讲解基本概念和基本分析方法，注重学生分析解决问题能力的培养。除绪论外，各章均有一定数量的例题和习题，并附有习题答案。

本书可作为高等学校工科各相关专业的“材料力学”课程教材，也可供大专院校、成人高校以及相关工程技术人员参考。

本书配有免费电子教案，读者可以从中国水利水电出版社网站下载，网址为：<http://www.waterpub.com.cn/softdown/>。

图书在版编目（CIP）数据

材料力学 / 胡庆泉，高曦光主编. -- 2版. -- 北京：
中国水利水电出版社，2018.7
应用技术型高等教育“十三五”精品规划教材
ISBN 978-7-5170-6682-8

I. ①材… II. ①胡… ②高… III. ①材料力学—高等
学校—教材 IV. ①TB301

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第166153号

策划编辑：宋俊娥 责任编辑：宋俊娥

书 名	应用技术型高等教育“十三五”精品规划教材 材料力学 CAILIAO LIXUE (第二版)
作 者	主 编 胡庆泉 高曦光 副主编 侯善芹 杨尚阳 崔 泽 李 琳
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京智博尚书文化传媒有限公司
印 刷	三河市龙大印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16 开本 16.5 印张 358 千字
版 次	2014 年 8 月第 1 版 2018 年 7 月第 2 版 2018 年 7 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	38.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

第二版前言

本教材根据教育部高等学校力学教学指导委员会最新颁布的力学类课程教学的基本要求,结合创建应用型本科院校,并依据“材料力学”课程教学大纲的内容和要求编写。

全书共 12 章,包括材料力学的基本理论,构件在拉伸与压缩、剪切、扭转、弯曲四种基本变形形式下的强度计算和刚度计算,应力状态与强度理论,组合变形构件的强度计算,压杆的稳定性计算,交变应力和动载荷,能量法等。除绪论外,每章后均有习题并附有习题答案。

在编写过程中,编者总结多年来的教学经验,结合目前创建应用型本科院校及课程理论教学学时数逐渐减少的实际情况,注意理论联系实际的方针和把握够用精炼的原则,充分吸取各高等院校近年来“材料力学”课程教学改革的经验,在内容的选择上以必需和够用为原则,内容编排由浅入深、循序渐进。考虑到土木、汽车和机械等专业在做弯曲内力图时的差别,在书中进行说明。并在弯曲变形、强度理论及组合变形中兼顾考虑,便于教师根据不同的专业选用。

本书由胡庆泉、高曦光等编写。其中胡庆泉编写绪论,刘隆编写第 1 章,崔泽编写第 2 章,刘建忠编写第 3 章,高华编写第 4 章,倪正银编写第 5 章,高曦光编写第 6 章,侯善芹编写第 7 章,李琳编写第 8 章,马昌红编写第 9 章,杨尚阳编写第 10 章,王继燕编写第 11 章,蒋彤编写附录。参加本书编写的人员都是多年担任“材料力学”课程教学的教师,包括教授、副教授等专业技术人员,他们都有较深的理论造诣和较丰富的教学经验。

全书由胡庆泉、高曦光统编定稿,侯善芹、杨尚阳、崔泽、李琳等对全书进行了详细审阅。

由于编者水平有限,难免有不足和欠妥之处,敬请广大教师和读者批评指正。

编者

2018 年 5 月

第一版前言

本教材根据教育部高等学校力学教学指导委员会最新颁布的力学类课程教学的基本要求,结合创建应用型本科院校,并依据“材料力学”课程教学大纲的内容和要求编写。

全书共 12 章,包括材料力学的基本理论,构件在拉伸与压缩、剪切、扭转、弯曲四种基本变形形式下的强度计算和刚度计算,应力状态与强度理论,组合变形构件的强度计算,压杆的稳定性计算,交变应力和动载荷,能量法等。除绪论外,每章后均有习题并附有习题答案。

在编写过程中,编者总结多年来的教学经验,结合目前创建应用型本科院校及课程理论教学时数逐渐减少的实际情况,注意理论联系实际的方针和把握够用精炼的原则,充分吸取各高等院校近年来“材料力学”课程教学改革的经验,在内容的选择上以必需和够用为原则,内容编排由浅入深、循序渐进。考虑到土木、汽车和机械等专业在做弯曲内力图时的差别,在书中进行说明。并在弯曲变形、强度理论及组合变形中兼顾考虑,便于教师根据不同的专业选用。

本书由胡庆泉、蒋彤等编写。其中胡庆泉编写绪论,刘隆编写第 1 章,崔泽编写第 2 章,刘建忠编写第 3 章,高华编写第 4 章,倪正银编写第 5 章,高曦光编写第 6 章,侯善芹编写第 7 章,李琳编写第 8 章,马昌红编写第 9 章,杨尚阳编写第 10 章,王继燕编写第 11 章,蒋彤编写附录。参加本书编写的人员都是多年担任“材料力学”课程教学的教师,包括教授、副教授等专业技术人员,他们都有较深的理论造诣和较丰富的教学经验。

全书由胡庆泉、蒋彤统编定稿,杨尚阳、刘隆、高曦光等对全书进行了详细审阅。

由于编者水平有限,难免有不足和欠妥之处,敬请广大教师和读者批评指正。

编者

2014 年 5 月

目 录

第二版前言

第一版前言

绪论	1
0.1 材料力学的基本任务	1
0.1.1 强度要求	2
0.1.2 刚度要求	2
0.1.3 稳定性要求	2
0.2 变形固体的基本假设	3
0.2.1 连续性假设	3
0.2.2 均匀性假设	3
0.2.3 各向同性假设	3
0.3 研究对象(杆件)的几何特征	4
0.4 内力、截面法和应力的概念	4
0.4.1 内力(附加内力)	4
0.4.2 截面法	5
0.4.3 应力	5
0.5 杆件变形的基本形式	6
0.5.1 轴向拉伸(或压缩)	6
0.5.2 剪切	6
0.5.3 扭转	7
0.5.4 弯曲	7
第1章 轴向拉伸与压缩	8
1.1 轴向拉伸与压缩的概念	8
1.2 拉(压)杆的内力计算	9
1.2.1 轴力	9
1.2.2 轴力图	9
1.3 拉(压)杆横截面及斜截面上的应力	10
1.3.1 横截面上的应力	10
1.3.2 斜截面上的应力	12
1.4 拉(压)杆的变形	13
1.5 拉(压)超静定问题	17
1.6 材料在拉伸压缩时的力学性能	22
1.6.1 低碳钢拉伸时的力学性能	22
1.6.2 铸铁拉伸时的力学性能	25

1.6.3 其他塑性材料拉伸时的力学性能	25
1.6.4 材料在压缩时的力学性能	26
1.7 轴向拉(压)杆的强度计算	27
1.8 应力集中的概念	30
习题 1	31
第 2 章 剪切	35
2.1 剪切变形的概念	35
2.2 剪切的实用计算	36
2.3 挤压的实用计算	37
习题 2	39
第 3 章 扭转	43
3.1 扭转问题的基本概念	43
3.2 圆轴扭转的内力	44
3.2.1 外力偶矩计算	44
3.2.2 横截面上的内力——扭矩	44
3.2.3 扭矩图	45
3.3 圆轴扭转横截面上的切应力	46
3.3.1 切应力互等定理	46
3.3.2 剪切胡克定律	47
3.3.3 圆轴扭转时横截面上的应力	47
3.3.4 极惯性矩和抗扭截面系数的计算	50
3.4 圆轴扭转的强度条件和强度计算	50
3.5 圆轴扭转的刚度条件和刚度计算	51
3.6 非圆截面杆扭转简述	53
习题 3	56
第 4 章 弯曲内力	60
4.1 弯曲的概念	60
4.2 受弯杆件的简化	61
4.3 剪力和弯矩	61
4.4 剪力方程和弯矩方程、剪力图和弯矩图	64
4.5 载荷集度、剪力和弯矩间的关系	67
4.6 按叠加原理作弯矩图	71
习题 4	72
第 5 章 弯曲应力	77
5.1 纯弯曲和横力弯曲	77
5.1.1 纯弯曲和横力弯曲的概念	77
5.1.2 纯弯曲试验	77
5.2 弯曲正应力	78
5.2.1 纯弯曲梁横截面上的正应力	78

5.2.2	横力弯曲正应力.....	81
5.2.3	弯曲梁的正应力强度校核.....	81
5.3	弯曲切应力.....	83
5.3.1	梁横截面上的切应力.....	83
5.3.2	弯曲切应力的强度校核.....	88
5.4	梁的合理设计.....	89
5.4.1	合理布置载荷和支座来降低 $M_{\max}$	90
5.4.2	合理选取截面形状来增大 W_z	90
5.4.3	采用等强度梁.....	91
	习题 5.....	92
第 6 章	弯曲变形.....	97
6.1	概述.....	97
6.2	梁的挠曲线近似微分方程.....	97
6.3	积分法求梁的弯曲变形.....	99
6.4	叠加法求梁的弯曲变形.....	102
6.5	简单超静定梁.....	106
6.6	梁的刚度条件和提高梁刚度的措施.....	109
6.6.1	梁的刚度条件.....	109
6.6.2	提高梁刚度的措施.....	110
	习题 6.....	111
第 7 章	应力状态分析和强度理论.....	115
7.1	应力状态概述.....	115
7.2	平面应力状态分析.....	117
7.2.1	解析法.....	117
7.2.2	图解法.....	121
7.3	空间应力状态简介.....	124
7.4	广义胡克定律.....	126
7.4.1	广义胡克定律.....	126
7.4.2	体积应变.....	127
7.4.3	复杂应力状态下的应变能密度.....	128
7.5	四种常用的强度理论.....	131
7.5.1	强度理论概述.....	131
7.5.2	四种常用的强度理论.....	132
7.6	莫尔强度理论.....	136
	习题 7.....	140
第 8 章	组合变形.....	144
8.1	组合变形的概念.....	144
8.2	斜弯曲.....	146
8.3	轴向拉伸(压缩)与弯曲.....	150

8.4 偏心压缩(拉伸)	153
8.5 扭转与弯曲	156
习题 8	159
第 9 章 压杆稳定	164
9.1 压杆稳定的概念	164
9.2 两端铰支细长中心受压直杆的临界压力	166
9.3 不同杆端约束下细长压杆临界力的欧拉公式	167
9.4 欧拉公式的适用范围和临界应力总图	169
9.4.1 临界应力与柔度	169
9.4.2 欧拉公式的适用范围	170
9.4.3 临界应力的经验公式和临界应力总图	170
9.5 压杆的稳定校核	173
9.5.1 稳定安全因数法	173
9.5.2 折减系数法	174
9.6 提高压杆稳定性的措施	178
9.6.1 选择合适的截面形状	178
9.6.2 改变压杆的约束条件	178
9.6.3 减小压杆的长度	178
9.6.4 合理选择材料	179
习题 9	179
第 10 章 能量法	184
10.1 概述	184
10.2 外载荷做的功	184
10.2.1 单个力作用下的外力功	184
10.2.2 多个力作用下的外力功	185
10.3 弹性体的应变能	185
10.3.1 拉(压)变形的应变能	185
10.3.2 扭转变形的应变能	186
10.3.3 弯曲变形的应变能	186
10.4 卡式定理	188
10.5 单位载荷法	190
10.6 图形相乘法	193
习题 10	196
第 11 章 动载荷及交变应力	200
11.1 概述	200
11.2 构件做等加速运动时的应力计算	200
11.3 构件受冲击载荷作用时的应力与变形	203
11.4 交变应力下材料的疲劳破坏和疲劳极限	207
11.4.1 交变应力和金属材料的疲劳破坏	207

11.4.2 交变应力的基本参量.....	209
11.4.3 疲劳的强度指标——疲劳极限.....	210
11.4.4 对称循环下的疲劳强度计算.....	213
习题 11.....	214
附录 I 平面图形的几何性质.....	217
I.1 静矩和形心.....	217
I.2 惯性矩、惯性积和惯性半径.....	219
I.3 平行移轴公式.....	221
I.4 转轴公式、主惯性轴和主惯性矩.....	223
习题.....	226
附录 II 型钢表.....	230
习题答案.....	246
参考文献.....	254

绪 论

材料力学是固体力学的一个基础分支，广泛应用于各个工程领域中，如飞机、火车、汽车、轮船、挖掘机、拖拉机、杆塔、井架、锅炉、房屋、桥梁等机器、设备或建筑结构的工程设计中，都必须用到材料力学的基本知识。对于高等工科院校的学生和各工程领域的工程师们，材料力学是必须具备的理论工具之一。

0.1 材料力学的基本任务

任何机械或工程结构，都由构件组成。如图 1 所示为桥式起重机的主梁、吊钩、钢丝绳；图 2 所示为悬臂吊车架的横梁 AB 、斜杆 CD 都是构件。在正常工作状态下，构件都要直接或间接受到相邻构件传递来的载荷作用，如建筑物的梁承受自身重力和其他物体的作用。构件一般由固体制成。在外力作用下，固体具有抵抗破坏的能力，但载荷过大，构件就会断裂；同时，在外力的作用下，固体的尺寸和形状会发生变化，称为变形。

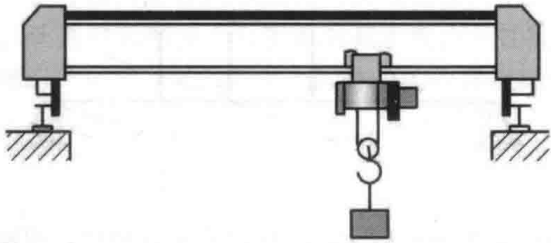


图 1

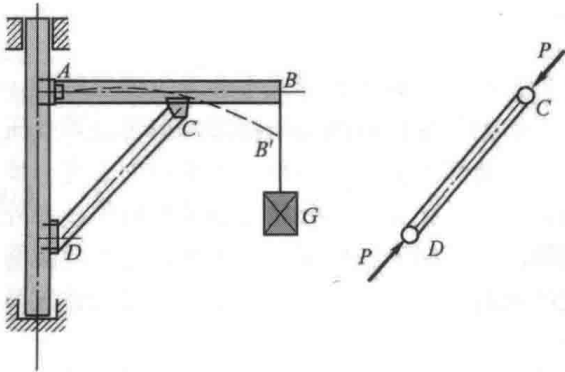


图 2

为保证正常工作, 构件应具有足够的能力负担所承受的载荷, 即具备足够的承载能力。因此, 构件应当满足以下要求。

0.1.1 强度要求

强度要求是指构件在确定的外力作用下, 不发生断裂或过量的塑性变形。例如储气罐不应爆破; 机器中的齿轮轴不应断裂失效; 建筑物的梁和板不应发生较大塑性变形。强度要求就是指构件应有足够抵抗破坏的能力。

0.1.2 刚度要求

刚度要求是指构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。例如图 3 中机床主轴不应变形过大, 否则影响加工精度。图 4 是简易桥梁在车载或人群载荷作用下的计算简图, 在设计时要保证简支梁的变形在许可的范围内。

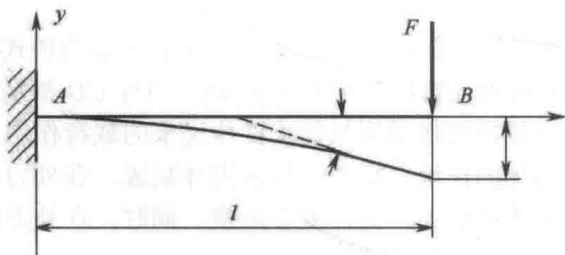


图 3

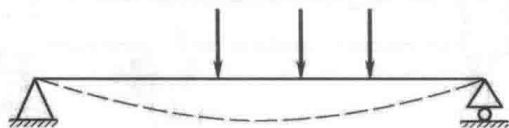


图 4

再如图 1 中吊车大梁变形过大, 会使跑车出现爬坡, 引起振动; 铁路桥梁变形过大, 会引起火车脱轨, 翻车。刚度要求就是指构件应有足够抵抗变形的能力。

0.1.3 稳定性要求

构件在某种受力方式下, 其平衡形式不会发生突然转变。例如细长的杆件受压时, 工程中要求它们始终保持直线的平衡形态。可是若受压力过大, 达到某一数值时, 压杆的直线平衡形态会变成不稳定平衡而失去进一步承载的能力, 这种现象称之为压杆的失稳。又如受均匀外压力的薄壁圆筒, 当外压力达到某一数值时, 它由原来的圆筒形的平衡变成椭圆形的平衡, 此为薄圆筒的失稳。失稳往往是突然发生而造成严重的工程事故。稳定性要求就是构件应具有足够保持原有平衡形态的能力。

一般来说, 选用高强度的材料或增加构件的截面尺寸, 可使构件具有足够的承载能力。但过分强调安全, 构件的尺寸选得过大或不恰当地选用质量较好的材

料,又会使构件的承载能力得不到充分发挥,从而浪费了材料,又增加了机械的重量和成本。为此材料力学的任务就是在满足强度、刚度、稳定性的要求下,为设计既安全又经济的构件,提供必要的理论基础和计算方法。

构件的强度、刚度和稳定性问题均与所用材料的力学性能有关,同样尺寸、形状的构件,当分别用不同的材料来制成时,它们的强度、刚度和稳定性也各不相同,构件的强度、刚度和稳定性的研究离不开对材料的力学性质的研究,而材料的力学性质需要通过试验的方法来测定,因此实验研究和理论分析是完成材料力学的任务所必需的手段。

0.2 变形固体的基本假设

理论力学中,所研究的固体都是刚体,就是说在外力作用下物体的大小和形状都保持不变。实际上,自然界中所有的固体都是变形体。即在外力作用下,一切固体都将发生变形,故称为变形固体。

由于变形固体种类繁多,工程材料中有金属与合金、工业陶瓷、聚合物等,其性质很复杂,对用变形固体制成的构件进行强度、刚度和稳定性计算时,为了使计算简化,经常略去材料的次要性质,对其做下列假设:

0.2.1 连续性假设

连续性假设认为整个物体在所占空间内毫无空隙地充满物质。实际上,由物质的微观结构知道,物体内部是存在空隙的,但这些空隙的大小与构件的尺寸相比非常微小,因此,认为材料密实不会影响对其宏观力学性能的研究。即固体在其整个体积内是连续的。可把力学量表示为固体点的位置坐标的连续函数。

0.2.2 均匀性假设

均匀性假设认为物体内的任何部分,其力学性能相同,与其所在位置无关。即从固体内任意取出一部分,无论从何处取也无论取多少其性能总是一样的。

如果物体是由两种或者两种以上介质组成的,例如混凝土构件由水泥、石子、沙子均匀搅拌而成,那么在只有石子处与只有沙子处其强度应是不同的,但是只要每一种物质的颗粒远远小于物体的几何形状,并且在物体内部均匀分布,从宏观意义上讲,也可以视为均匀材料,因此认为混凝土构件各处有相同的强度。当然对于明显的非均匀物体,例如环氧树脂基碳纤维复合材料,不能处理为均匀材料。

0.2.3 各向同性假设

各向同性假设认为,材料沿各方向的力学性质均相同。例如由晶体构成的金属材料,由于单晶体是各向异性的,微观上显然不是各向同性的。但是由于晶体尺寸极小,而且排列是随机的,因此宏观上,材料性能可认为各向同性。沿不同方向的力学性质不相同的材料,称为各向异性材料。例如木材,顺纹方向与横纹方向的力学性质有显著的差别。材料力学所研究的对象只限于各向同性的可变形固体。

构件在外力作用下将发生变形。当外力不超过一定限度时, 构件在外力去掉后均能恢复原状, 外力去掉后能消失的变形称为弹性变形。当外力超过某一限度时, 则在外力去掉后只能部分地复原而残留一部分不能消失的变形, 不能消失而残留下来的变形称为塑性变形。大多数构件在正常工作条件下均要求其材料仅发生弹性变形。所以在材料力学中所研究的大部分问题局限在弹性变形范围内。

综上所述, 材料力学是研究连续、均匀、各向同性的变形固体, 在微小的弹性变形内的强度、刚度、稳定性问题的一门学科。

0.3 研究对象(杆件)的几何特征

实际构件有各种不同的形状。材料力学所研究的构件主要是杆件, 杆件是纵向(长度方向)尺寸远比横向(垂直于长度方向)尺寸要大得多的构件。房屋的梁、柱及传动轴等一般都被抽象为杆件。杆件的几何要素是横截面和轴线, 其中横截面是与轴线垂直的截面, 轴线是横截面形心的连线。

杆件按轴线的形状可分为直杆和曲杆, 其中轴线为直线的杆件为直杆, 如图 5 所示, 轴线为曲线的杆件为曲杆, 如图 6 所示。按截面的形状进行分类, 杆件可分为等截面杆和变截面杆, 横截面形状和大小不变的杆称为等截面杆, 其他的则称为变截面杆。材料力学研究的多是等截面的直杆, 简称为等直杆。

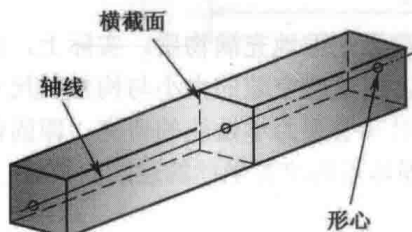


图 5

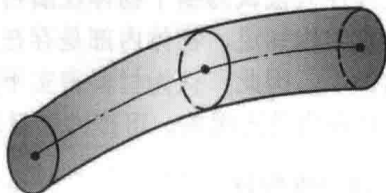


图 6

0.4 内力、截面法和应力的概念

0.4.1 内力(附加内力)

物体在受外力变形时, 其内部各部分之间由于相对位置发生改变而引起的相互作用就是内力。

当物体不受外力作用时, 内部各质点之间存在着相互作用力, 也称为内力。但材料力学中所指的内力是与外力和变形有关的内力。即随着外力的作用而产生, 随着外力的增加而增大, 当达到一定数值时会引起构件破坏的内力, 此力称为附加内力。为简便起见, 今后统称为内力。

0.4.2 截面法

进行强度、刚度计算必须由已知的外力确定未知的内力，内力分布在横截面的各点上（在截面上是连续分布的），只有用假想的截面将杆件截成两部分时才能表现出来，这种显示内力的方法称为截面法。截面法的步骤可用截、取、代、平四个字代替。

- （1）截：欲求某一截面上的内力，用一假想平面将物体分为两部分。
- （2）取：取其中任意一部分为研究对象，而弃去另一部分。
- （3）代：用作用于截面上的内力，代替舍弃部分对留下部分的作用力。
- （4）平：建立留下部分的平衡方程，由外力确定未知的内力。

图 7 为截面法的求解过程，内力表示为连续分布力，用平衡方程，可求其分布内力的合力。

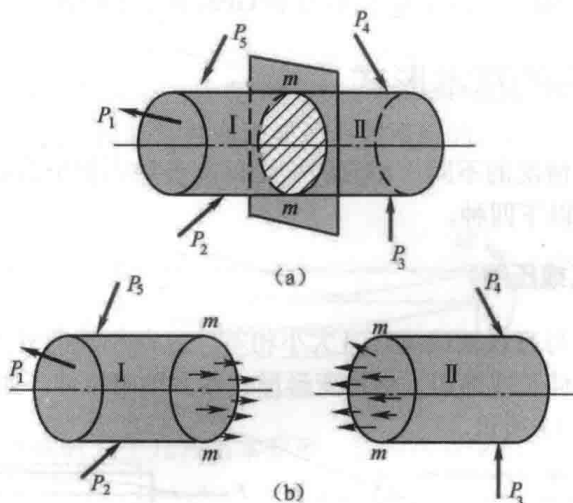


图 7

截面法的概念非常重要，其关键是截开杆件取脱离体，使得杆件的截面内力转化为脱离体上的外力，再运用平衡条件对未知内力进行分析和计算。

0.4.3 应力

用截面法求得的内力，不能说明分布内力系在截面内某一点处的强弱程度，要研究内力在截面上的分布规律需引入内力集度的概念。

如图 8 所示，围绕 M 点取微小面积 ΔA 。根据均匀连续假设， ΔA 上必存在分布内力，设它的合力为 ΔF ， ΔF 与 ΔA 的比值为

$$p_m = \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

p_m 是一个矢量，代表在 ΔA 范围内，单位面积上内力的平均集度，称为平均应力。当 ΔA 趋于 0 时， p_m 的大小和方向都将趋于一定极限，如图 9 所示，即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} p_m = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA}$$

p 称为 M 点处的(全)应力。通常把应力 p 分解成垂直于截面的分量 σ 和切于截面的分量 τ , σ 称为正应力, τ 称为剪应力或切应力。

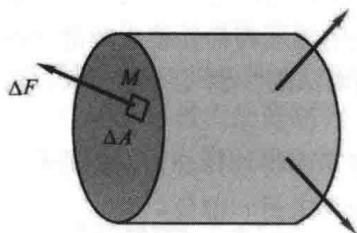


图 8

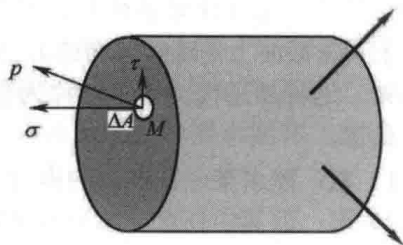


图 9

应力即单位面积上的内力, 表示某微截面积 $\Delta A \rightarrow 0$ 处内力的密集程度。

在国际单位制中, 应力的单位是 N/m^2 , $1\text{N/m}^2 = 1\text{Pa}$ (帕斯卡)。实际应用中, 由于应力数值较大, 故常用的单位有 MPa 和 GPa , 其中 $1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$, $1\text{GPa} = 10^9\text{Pa}$ 。

0.5 杆件变形的基本形式

由于杆件受力情况的不同, 相应的变形就有各种不同形式, 在工程结构中, 杆件的基本变形有以下四种。

0.5.1 轴向拉伸(或压缩)

在一对作用线与直杆轴线重合且大小相等、方向相反的外力作用下, 直杆的主要变形是长度的伸长或缩短, 这种变形形式称为轴向拉伸, 如图 10 所示, 或称为轴向压缩, 如图 11 所示。

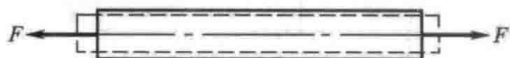


图 10



图 11

0.5.2 剪切

如图 12 所示, 变形形式是由大小相等、方向相反、作用线相互平行且相距很近的一对力引起的。表现为受剪杆件的两部分沿外力作用方向发生相对错动, 这种变形形式称为剪切。

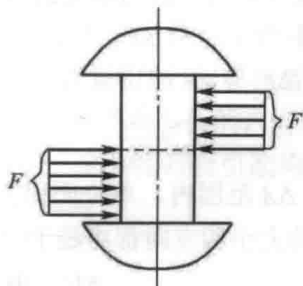


图 12

0.5.3 扭转

如图 13 所示, 在一对转向相反且作用在与杆轴线相垂直的两平面内的外力偶作用下, 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。

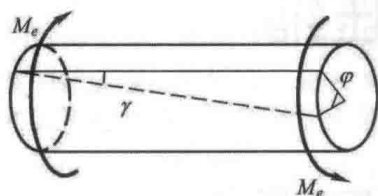


图 13

0.5.4 弯曲

如图 14 所示, 变形形式是由垂直于杆件轴线的横向力, 或由作用于包含杆轴的纵向平面内的一对大小相等、方向相反的力偶引起的, 表现为杆件轴线由直线变为受力平面内的曲线, 这种变形形式称为弯曲。

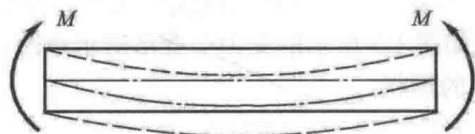


图 14

组合变形: 杆件同时发生几种基本变形, 称为组合变形。