

转型发展系列教材

材料力学

主 编◎王丽娟 张镇 邓成尧

应用型本科 机电类专业“十三五”规划教材

材 料 力 学

主 编 王化更 吴懋亮

副主编 王 昊 纪冬梅 王道累

西安电子科技大学出版社

图书在版编目（C I P）数据

材料力学 / 王丽娟, 张镇, 邓成尧主编. —成都:
西南交通大学出版社, 2019.8
转型发展系列教材
ISBN 978-7-5643-6993-4

I. ①材… II. ①王… ②张… ③邓… 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 (2019) 第 152565 号

转型发展系列教材

Cailiao Lixue

材料力学

主编 王丽娟 张 镇 邓成尧

责任编辑 刘 昕

封面设计 严春艳

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 成都中永印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 15.75

字数 340 千

版次 2019 年 8 月第 1 版

印次 2019 年 8 月第 1 次

定价 47.50 元

书号 ISBN 978-7-5643-6993-4

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

转型发展系列教材

材料力学

主 编 © 王丽娟 张 镇 邓成尧

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

总 序

教育部、国家发展改革委、财政部《关于引导部分地方普通本科高校向应用型转变的指导意见》指出：

“当前，我国已经建成了世界上最大规模的高等教育体系，为现代化建设作出了巨大贡献。但随着经济发展进入新常态，人才供给与需求关系深刻变化，面对经济结构深刻调整、产业升级加快步伐、社会文化建设不断推进特别是创新驱动发展战略的实施，高等教育结构性矛盾更加突出，同质化倾向严重，毕业生就业难和就业质量低的问题仍未有效缓解，生产服务一线紧缺的应用型、复合型、创新型人才培养机制尚未完全建立，人才培养结构和质量尚不适应经济结构调整和产业升级的要求。”

“贯彻党中央、国务院重大决策，主动适应我国经济发展新常态，主动融入产业转型升级和创新驱动发展，坚持试点引领、示范推动，转变发展理念，增强改革动力，强化评价引导，推动转型发展高校把办学思路真正转到服务地方经济社会发展上来，转到产教融合校企合作上来，转到培养应用型技术技能型人才上来，转到增强学生就业创业能力上来，全面提高学校服务区域经济社会发展和创新驱动发展的能力。”

高校转型的核心是人才培养模式，因为应用型人才和学术型人才是有所不同的。应用型技术技能型人才培养模式，就是要建立以提高实践能力为引领的人才培养流程，建立产教融合、协同育人的人才培养模式，实现专业链与产业链、课程内容与职业标准、教学过程与生产过程对接。

应用型技术技能型人才培养模式的实施，必然要求进行相应的课程改革，我们这套“转型发展系列教材”就是为了适应转型发展的课程改革需要而推出的。

希望教育集团下属的院校，都是以培养应用型技术技能型人才为职责使命的，人才培养目标与国家大力推动的转型发展的要求高度契合。在办学过程中，围绕培养应用型技术技能型人才，教师们在不同的课程教学中进行了卓有成效的探索与实践。为此，我们将经过教学实践检验的、较成熟的讲义陆续整理出版。一来与兄弟院校共同分享这些教改成果，二来也希望兄弟院校对于其中的不足之处进行指正。

让我们共同携起手来，增强转型发展的历史使命感，大力培养应用型技术技能型人才，使其成为产业转型升级的“助推器”、促进就业的“稳定器”、人才红利的“催化器”！

汪辉武

2016年6月

前 言

材料力学是高等工科院校开设的专业基础课程，理论性与应用性都较强。随着教学内容和课程体系改革的深入，为使轨道交通类学生在有限的学时里理解和掌握材料力学的基本原理和基本方法，结合应用型大学相关专业的办学特点和学生自身学习情况，特编写了此教材。希望既能在内容上满足广大师生的要求，又能让学生通过学习本教材打下扎实的力学基础。

西南交通大学希望学院机电与轨道车辆工程系王丽娟、张镇、邓成尧三位教师根据自己多年的教学经验，历经两年的时间编写了适合机械专业及轨道交通类专业发展的应用型大学本科材料力学教材。其中第 2~8 章由王丽娟编写；张镇和邓成尧分别承担了第 9、10 章和第 1 章的编写任务；审查工作由邓成尧完成。本教材结合机械专业和轨道交通类专业的教学内容及现场应用实例进行了修改和创新。

本教材在内容编写上，根据应用型学院办学特点，结合院校学生自身学习情况，遵从由浅入深，循序渐进的原则，力求结构严谨、着重应用、突出重点、简明易学。编入的一些内容和例题，除了结合机械专业与轨道交通车辆专业现场实例以外，还参考了一些其他院校编写的优秀教材，在此一并表示感谢。另外，书中未涉及的能量法与动荷载等相关章节，可以参阅其他优秀教材。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏和欠妥之处，诚望读者批评指正。

编 者

2019 年 3 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 材料力学的基本任务	1
1.2 材料力学的基本假设	2
1.3 内力和截面法	3
1.4 应力与应变	5
1.5 杆件变形的基本形式	7
习 题	9
第 2 章 轴向拉伸与压缩	10
2.1 轴向拉压杆的概念	10
2.2 拉压杆的轴力与轴力图	11
2.3 拉压杆的应力	14
2.4 拉压杆的变形	19
2.5 材料在拉（压）时的力学性能	24
2.6 许用应力、安全系数、强度条件	29
2.7 拉压杆超静定问题	33
2.8 应力集中的概念	37
2.9 连接件的强度计算	39
习 题	47
第 3 章 截面图形的几何性质	50
3.1 静矩和形心	50
3.2 惯性矩和惯性积	55
3.3 惯性矩和惯性积的平行移轴公式	60
3.4 惯性矩和惯性积的转轴公式	63
习 题	66
第 4 章 扭 转	68
4.1 扭转的概念与实例	68
4.2 传动轴的外力偶矩、扭矩及扭矩图	69
4.3 薄壁圆管的扭转	74

4.4	圆轴扭转时的应力和强度条件	77
4.5	圆轴扭转时的变形和刚度条件	84
4.6	矩形截面杆的自由扭转	89
	习 题	93
第 5 章	弯曲内力	95
5.1	平面弯曲的概念及梁的力学简图	95
5.2	梁的简力和弯矩	98
5.3	剪力方程和弯矩方程, 剪力图和弯矩图	103
5.4	弯矩、剪力和荷载集度间微分关系	111
5.5	用叠加法作梁的弯矩图	118
	习 题	120
第 6 章	弯曲应力	121
6.1	弯曲正应力	121
6.2	梁的正应力强度条件	127
6.3	梁的弯曲切应力及强度条件	133
6.4	提高梁强度的措施	141
	习 题	146
第 7 章	弯曲变形	149
7.1	梁的挠度与转角	149
7.2	挠曲线的近似微分方程	150
7.3	用积分法计算梁的位移	152
7.4	用叠加法计算梁的位移	157
7.5	梁的刚度条件及提高梁的刚度措施	161
	习 题	165
第 8 章	应力状态和强度理论	167
8.1	应力状态的概念	167
8.2	平面应力状态分析的解析法	170
8.3	平面应力状态分析的图解法	173
8.4	三向应力状态简介	177
8.5	广义胡克定律	179
8.6	强度理论	181
第 9 章	组合变形	186
9.1	组合变形的概述	186
9.2	拉伸 (或压缩) 与弯曲的组合	189

9.3 偏心压缩（拉伸）	193
9.4 弯曲与扭转的组合	199
习 题	206
第 10 章 压杆的稳定性	209
10.1 压杆稳定性简介	209
10.2 细长压杆的欧拉（Euler）临界荷载	210
10.3 中、小柔度压杆的临界应力	216
10.4 压杆的稳定条件	220
10.5 压杆的合理设计	223
习 题	225
附录 常用型钢规格表	228
参考文献	239

第1章 绪 论

1.1 材料力学的基本任务

1. 基本概念

为什么火车轨道会采用类似工形截面？汽车的传动轴为什么宜采用空心结构？工程机械中的起重机臂为什么采用框形结构？厂房的横梁为什么是鱼腹形……工程中诸如此类的例子随处可见，但它们的结构为什么要这么去设计，可能就需要用材料力学的方法和原理去解释了。

各种工程机械、建筑物等由构件组成，即组成工程结构或机械的每一部分统称为**构件**。如图 1-1 所示桥式起重机结构中的横梁、吊索，如图 1-2 (a) 所示悬臂梁结构中的横梁就是这些结构的构件。作用在横梁上的外力 F ，可以称为**荷载**。梁在外力 F 的作用下发生的固体内各点相对位置的改变，称之为**变形**，宏观上看就是物体尺寸和形状的变化。当变形随外力解除而消失时，称这种变形为**弹性变形**；当外力解除后，梁没有恢复到原来的形状和尺寸，还存在一定的不可恢复的变形，称这种变形为**塑性变形**（残余变形）。在荷载的作用下，构件具有抵抗变形的能力称为**刚度**；当荷载增大，构件具有抵抗破坏的能力称为**强度**，但构件抵抗这种破坏的能力是有限的。当荷载的作用点和方向改变，如图 1-2 (b) 所示，此时梁的平衡形式发生变化，即构件在荷载的作用下，保持原有平衡状态的能力称为**稳定性**。

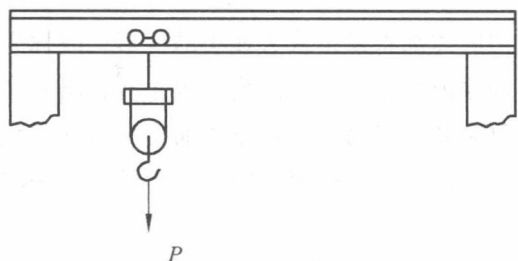


图 1-1 横梁与吊索构件

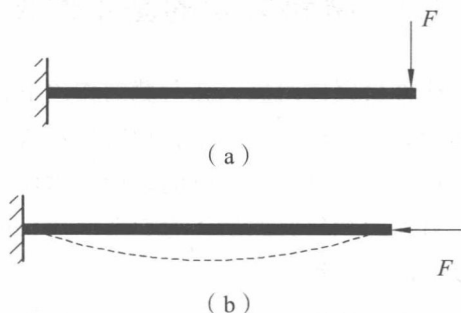


图 1-2 悬臂梁的加载

为保证构件的正常工作，失稳、过大的弹性变形、破坏都是不允许出现的，所以构件必须满足以下 3 个基本条件。

(1) **具有足够的强度。**构件在荷载的作用下，若具有足够的强度，就能够安全地承受荷载，而不会发生因强度低而引起的严重永久变形或断裂现象。比如可乐罐在外力的作用下会发生严重的永久性不可恢复的变形，粉笔在外力的作用下也会发生断裂现象。

(2) **具有足够的刚度。**在荷载的作用下，构件的最大变形不应超过实际使用中所允许的数值。否则构件刚度小，荷载大，就很容易产生变形。比如机床主轴若在外力的作用下导致变形过大，就会引起轴上的齿轮啮合不良，进而导致轴承磨损。

(3) **具有足够的稳定性。**构件在荷载的作用下，若具有足够的稳定性，构件保持原有平衡形式的能力就越好。如内燃机中的连杆在外力的作用下被压弯，从而失去保持直线平衡状态的稳定形式，就会影响内燃机正常工作。

对具体的构件而言，强度、刚度、稳定性是有主次之分的，如粉笔以强度要求为主，机床主轴以刚度要求为主，而内燃机连杆则以稳定性要求为主。

2. 材料力学基本任务

若横截面结构设计不合理、尺寸太小、选材不当，安全性就得不到保证，从而影响构件正常工作。相反，不恰当地加大横截面尺寸或选用优质的材料，虽然满足要求，但无疑是增加了成本和质量，造成浪费，也难以充分发挥出构件的承载能力。材料力学的基本任务就是在满足强度、刚度、稳定性的条件下，解决“既安全可靠、又经济适用”这一矛盾的。同时，材料力学为设计既经济又安全的构件提供必要的理论基础和计算方法。

经过简化建立的理论，都需要通过试验来验证。所以在研究构件的强度、刚度和稳定性时，还需要了解材料的力学性能。因此在理论分析的基础上，试验研究是完成材料力学任务所需的途径和手段。

1.2 材料力学的基本假设

构件由固体组成，在荷载的作用下，一切固体都将发生或大或小的变形，故称为**变形固体**。在理论力学中，把物体看成刚体的原因是，当物体的变形很小时，研究物体的机械运动是不受影响的，所以物体可以忽略变形以简化计算过程而得出可靠的结果。材料力学研究的物体为变形固体，即在荷载作用下，研究与构件变形性质相关的强度、刚度、稳定性。

变形固体由于材料的不同，呈现出不同的力学性质，即使是同一种材料，其力学性能在不同条件下也可能有差别。分析计算时，若考虑变形固体材料的复杂性质是不太可能的，这样不仅意义不大，还会加大计算的工作量。在材料力学中对变形固体进行研究时，通常需要做出以下假设。

(1) 连续性假设。

实际的变形固体，从微观组织来看，都存在不同程度的空隙。这些空隙的大小远远小于宏观尺寸，对计算结果影响不大，所以可以忽略不计，从而认为变形固体材料内部没有空隙。因为材料是连续的，进而可以认为构件在荷载作用下的变形也是连续的。

(2) 均匀性假设。

金属变形固体是由许多微小的晶粒组成，各个晶粒的大小、性质及排列方向都可能影响变形固体的力学性能。又因为晶粒本身很小、数量较多、排列无规则，固体的每一部分力学性能用统计平均值的观点考虑，可提出均匀性假设。可以认为材料内部每一部分都是均匀分布的，各点处的力学性能完全相同。根据这一假设，在构件中截取任一微小部分进行研究时都是均匀分布的，进而可以将这个结论推广到整个构件上。

(3) 各向同性假设。

就金属固体中单一的晶粒来说，不同方向力学性质是不一样的，但金属固体包含晶粒数量较多，排列又不规则，因此各个方向的力学性能可以近似趋于一致。也就是说，认为物体内部不同方向的力学性能相同，称之为各向同性材料，如钢、铜、铸铁、陶瓷、玻璃等；沿不同方向力学性能不同的材料称为各向异性材料，如木材、胶合板、纤维增强材料等。

(4) 小变形假设。

构件受荷载的作用，可能会发生或大或小的变形，当构件的变形极其微小，比构件本身尺寸要小得多时，称此变形为小变形。材料力学限于研究小变形问题，在利用小变形条件计算时，可以忽略构件的变形，按变形前的原始尺寸进行。这样在简化材料力学的计算过程的同时，又满足工程要求。

运用这4个基本假设，不仅可以简化计算过程，而且得出的结果与实际值相差不大。大多数情况下只限于研究弹性范围内的小变形情况。

1.3 内力和截面法

1. 内 力

外力作用引起构件内部的附加相互作用力称为内力，即分子间的相互作用力。构件在没有受外力的情况下，内部各相邻分子之间存在相互作用的内力（可称之为固有内力），使各分子保持一定的相对位置，因而构件可以具有一定的几何尺寸和形状。当构件受到外力的作用后，内部的各分子相邻部分对这种相对位置的改变产生抵抗力，这种抵抗力可以看成附加内力，是在固有内力的基础上，在外力作用下产生的，简称为内力。当外力增大时，这种内力就会相应增大，当外力数值达到构件的某一极限时，构件就会被破坏。当外力解除后，内力就会随之消失。所以，材料力学所研究的内力都是由外力的作用而产生的。内力是研究构件强度、刚度、稳定性的基础，所以，本书首先讨论计算内力的方法。

2. 截面法

计算内力的方法一般采用截面法。任取构件如图 1-3 所示，构件上作用的几个力使其处于平衡状态。为了计算构件上任一截面的内力，采用截面法步骤如下：

- (1) 用一假想平面 $m-m$ 将构件分为 I、II 两部分。
- (2) 根据实际计算情况，留下左半段 I 或右半段 II 为研究对象。
- (3) 为了使留下那部分保持平衡，将弃去的部分用它对留下部分的作用内力代替。
- (4) 对留下部分写平衡方程，求出内力的值。

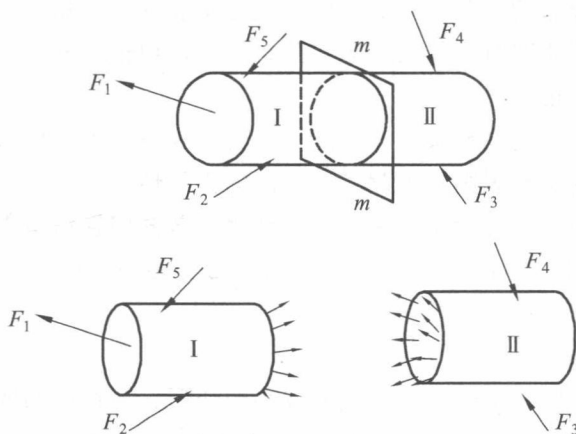


图 1-3 截面法分拆构件

在分析计算构件的内力时，由于已假设构件是连续、均匀、各向同性的变形体，所以截面法切开构件任一截面进行计算时，可认为构件内部都是连续分布的。

例 1-1 如图 1-4 (a) 所示悬臂梁上作用外力 F ，试求梁上指定截面的内力。

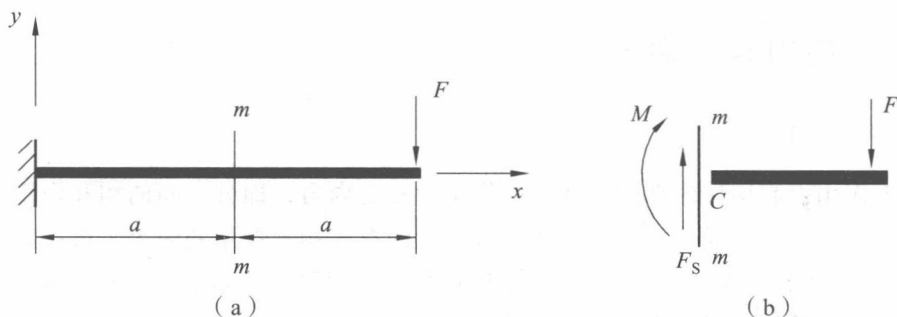


图 1-4 悬臂梁受力

解：取右半段为研究对象，如图 1-4 (b) 所示，用内力代替弃去的左半段，列平衡方程式有

$$\sum F_y = 0; F_S - F = 0; F_S = F$$

$$\sum M_C = 0; -M - F \cdot a = 0; M = -F \cdot a$$

从以上结果可以看出， $m-m$ 截面上的内力由力 F 和力矩 $F \cdot a$ 两部分组成。

1.4 应力与应变

1. 应 力

用截面法求出的内力是各分子之间所有附加内力的合力。仅用所求出的内力大小来衡量构件的强度是远远不够的，还需要考虑内力所在截面的面积大小，因此需要讨论内力的密集程度，引入应力的概念。一般内力在截面上的分布是不均匀的，而构件的破坏通常是从内力分布最集中的地方开始的。所以，把受力构件某截面上一点处的内力集度定义为应力，表示单位面积上内力的大小。

任取如图 1-3 所示右半段为研究对象，一般情况下，内力在截面上的分布是不均匀的。在截面上任意处围绕 C 点取微面积 ΔA ，如图 1-5 (a) 所示，设 ΔA 上的附加内力合力为 ΔF ，则

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

式中， P_m 称为微面积 ΔA 上的平均应力， P_m 是一个矢量，它的大小和方向随 ΔF 的变化而变化，当 ΔA 趋于一个极限值时，则有

$$P = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

P 称为点 C 的总应力，如图 1-5 (b) 所示，可以将总应力 P 分解为沿截面法向的正应力 σ ，和沿截面切向的切应力（剪应力） τ 。从而可以得出以下关系式：

$$P^2 = \sigma^2 + \tau^2 \quad (1-1)$$

应力的国际单位为帕斯卡 (Pa)， $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ ，材料力学中常用的应力单位换算式是 $1 \text{ GPa} = 10^3 \text{ MPa} = 10^9 \text{ Pa}$ 。

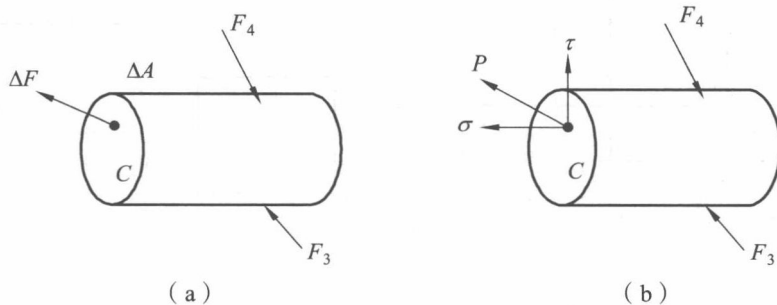


图 1-5 受力构件的力和应力

2. 应 变

1) 线应变

构件内任一点或单元体因外力作用引起的形状和尺寸的相对改变，称为应变。构件受外力作用变形后，其各个微小部分的形状都将发生改变，应变就是用于度量构件上一点变形程度的基本量。为了研究构件内各点处的应变，先将构件分割成无数个如图 1-6 (a) 所示微小六方体。在外力作用下六方体产生变形。从图 1-6 (b) 中可以看出， MN 边由原长 Δx 伸长到 $\Delta x + \Delta \delta x$ ， $\Delta \delta x$ 是在外力作用下 MN 的伸长量，为了度量一点处变形的强弱，就需引进应变的概念。当 MN 长度内各点处的变形长度相同，则

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta \delta x}{\Delta x}$$

式中， ε_m 为 x 方向的平均应变。当 MN 长度内各点处的变形程度不相同时，可以将 MN 的长度无限缩小，即 Δx 趋于 0，有

$$\varepsilon_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta \delta x}{\Delta x} = \frac{d\delta x}{dx}$$

ε_x 为线应变，它是一个无量纲量。同理，可定义微小正方体其他两个方向的线应变 ε_y 、 ε_z 。上述微小六方体，当各边都趋于无穷小时，称为单元体。

2) 切应变

单元体在受外力的作用时，不仅边长会发生长度的变化，相互垂直的两条棱边夹角也会发生变化，如图 1-6 (b) 所示。其夹角的改变量 γ 称为切应变，切应变量为弧度 (rad)。

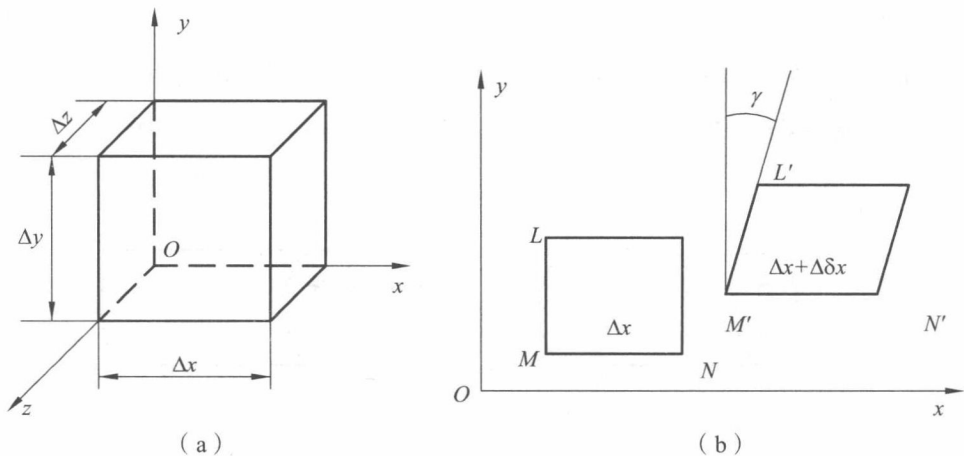


图 1-6 单元体的应变

例 1-2 如图 1-7 所示，已知薄板的两条边固定，变形后 $a'b$ ， $a'd$ 仍为直线。试求 ab 边的 ε_m 和 ab 、 ad 两边夹角的变化。

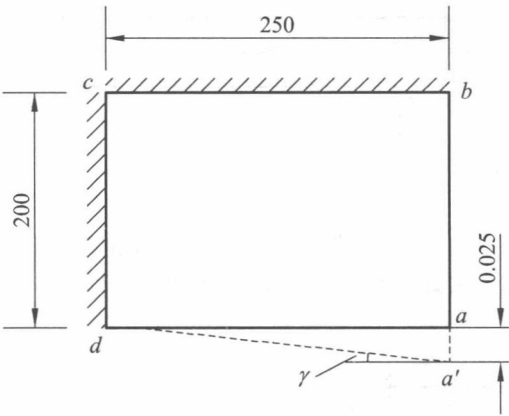


图 1-7 薄板两边变形

解：由平均应变的定义有

$$\varepsilon_m = \frac{a'b-ab}{ab} = \frac{0.025}{200} = 1.25 \times 10^{-6}$$

因为 ab 、 ad 两边夹角的变化为切应变 γ ，则有

$$\gamma \approx \tan \gamma = \frac{0.025}{250} = 10^{-4} \text{ (rad)}$$

1.5 杆件变形的基本形式

实际工程中，构件有各种各样的形状和尺寸，为了便于研究，根据构件的几何特征及各个方向的尺寸大小，大致分为以下四类。

杆：构件长度远大于横截面尺寸。轴线为直线的杆称为直杆；横截面的大小形状不变的杆，称为等直杆；横截面的大小或形状变化的杆，称为变截面杆。轴线为曲线的杆称为曲杆。

板：构件一个方向的尺寸远小于另外两个方向的尺寸，且中面为平面。

壳：构件一个方向的尺寸远小于另外两个方向的尺寸，且中面为曲面。

块：三个方向尺寸基本相同。

材料力学中主要研究的是等截面直杆,杆件在荷载作用下的变形可以有多种形式，但基本变形只有轴向拉伸（压缩）、剪切、扭转、弯曲这 4 种形式。

1) 轴向拉伸（压缩）

作用在杆上的外力与杆的轴线重合，变形表现为杆件长度发生伸长或缩短，如图 1-8 所示。

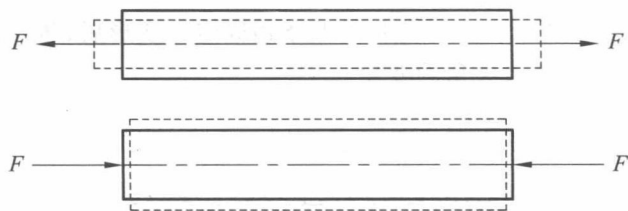


图 1-8 杆件的拉伸与压缩

2) 剪 切

作用在杆件上的外力为大小相等、方向相反，且相距很近的一对横向力，变形表现为杆件沿力作用方向发生相对错动，如图 1-9 所示。

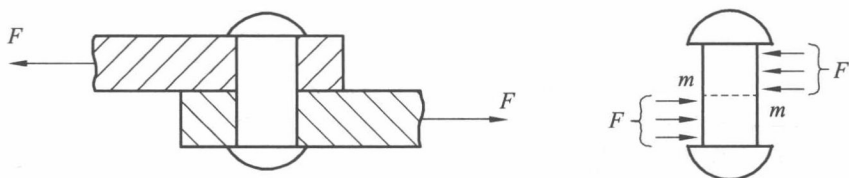


图 1-9 杆件的剪切变形

3) 扭 转

作用在杆件上的外力偶，其作用面垂直于杆轴线，变形表现为各截面绕轴线发生相对转动，如图 1-10 所示。

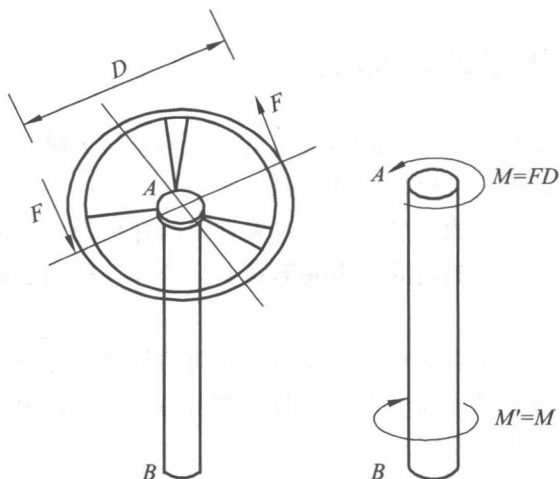


图 1-10 力偶对杆件的作用

4) 弯 曲

作用在杆件上的外力为垂直于杆轴线的轴向力，或为位于纵向平面内一对大小相等、方向相反的力偶，如图 1-11 所示。