

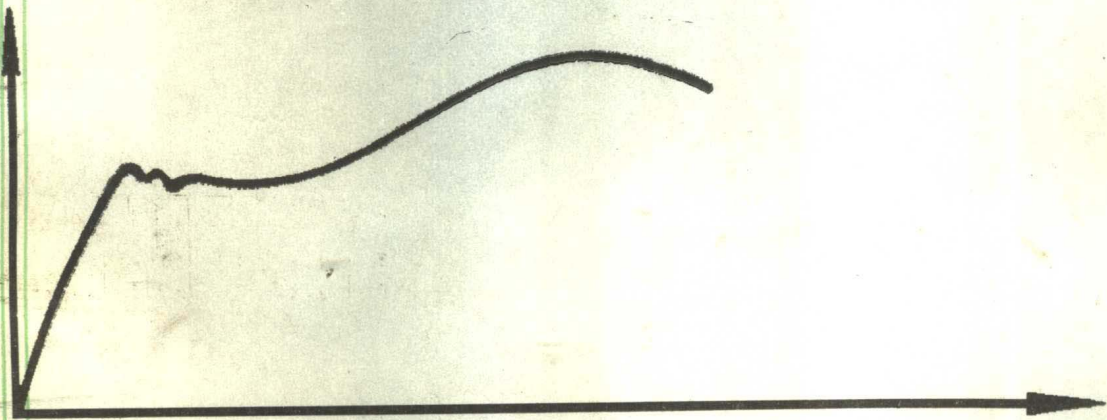
~~978043~~

979338

应用材料力学

肖敬勋

主编



中国建材工业出版社

~~975043~~

979336

应用材料力学

肖敬勋 主编

中国建材工业出版社

(京)新登字 177 号

图书在版编目(CIP)数据

应用材料力学/萧敬勋主编. —北京:中国建材工业出版社,1995.2

ISBN 7-80090-213-7

I. 应… I. 萧… III. 材料力学—建筑材料 N. TU501

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 02483 号

中国建材工业出版社出版(北京海淀区三里河路 11 号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京市兰恒信息公司激光照排

北京管庄永胜印刷厂

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17.5 字数: 400 千字

1995 年 2 月第 1 版 1995 年 2 月第 1 次印刷

印数: 1-3000 册 定价: 20.00 元

ISBN 7-80090-213-7/O·1

TU501
9046

写在书墨飘香时

书终于出版了,墨香阵阵、沁人心脾,悠悠往事使人感慨良多。

笔者在高等学校材料力学讲坛“耕耘”多年,每每听到涉足这一领域的青年抱怨:“公式多、头绪乱、学习难”。如何能使他们摆脱困境,颇使笔者心仪已久。其时适逢全国材料力学教材研讨会召开于成都,会上许多代表希望出版风格各异、体系不同的书,这一呼吁与笔者的愿望不谋而合,因为笔者携带的论文正是评述别具风格的S.铁摩辛柯(美国)的材料力学。然而十年过去了,笔者携带草拟的书稿或奔走于出版社、或枯坐于起居室,这一领域仍然是独树一帜,寂寞得很。不错,教师的工作过程是寂寞的,探索之路尤为寂寞,但是为何艺海放歌,“花好月圆”;书山探幽却如此迂回曲折?

时光荏苒、星移斗转,我国的改革已跨过了十五个年头,出版界也在弹着改革的“弦”,春天又来到了神州大地,在一次偶然的机会我结识了中国建材工业出版社的教材编辑室同志,我与他们素昧平生,然而,他们不为本书是否盈利所左右,也不以作者的默默无闻而敷衍,询问垂听、不择细流,恒以社会效益为重,终于使笔者如愿以偿,这一历程可谓:愁肠百结咫尺书,丹华一掷十年功。

本书体系独树一帜,全书分三大部分,第一部分:应力与应变分析,第二部分:实用计算——强度计算、刚度计算、稳定计算,第三部分:应用专题——园板、薄壳、厚壁园筒、旋转园盘、冲击载荷。本书开卷伊始即引入了应力与应变分析,这不仅使本书的基础理论更加扎实,系统性更趋完善,而且又强化了与其它后续学科衔接时的基础性,这可避免应力与应变分析“后发制人”(即此类书籍这部分内容一般放在各简单变形之后)形成“学习难”的困境。

书中将强度计算、刚度计算、应用专题独立成章,分别阐述这突出了本书的应用性,又避免了强度、刚度计算“齐头并进”形成的“公式多、头绪乱”的弊端。书中每章均有理论概要,具有手册的简明性和实用性。本书每章均有方法指导,具有自学丛书的指导性和启发性。并有例题选编与分析讨论:运用理论求解问题,评述概念疏导思路,以求举一反三之功效。

本书符合国家教委高等工业学校课程指导委员会颁发的材料力学课程教学基本要求。可作高等工科院校本科生的教材,也可供工程师及技术人员参考。

在当前的氛围里,本书的内容决非是宏伟建筑上高耸云霄的耀眼红星,然而在国家的基本建设中,开路、架桥它是“先锋”,建楼、造船它是“基础”,因此欲献身于建筑、机械、航空、造船等工程领域朋友们请购买本书,它将是您终生的良师益友。

参加本书编写的是陈秋波、李熙山、尹剑、萧敬勋、由萧敬勋担纲主编,编写期间晨霜夕露、青灯黄卷,确也是诚恐诚惶,然而由于编者水平及时间所限,倘有不妥之处,恭请读者批评、指正,谢谢。

主编

1994.10

目 录

1. 基本概念	(1)
1.1 内容导读	(1)
1.2 构件的失效及内力、应力概念	(3)
1.3 应用材料力学所研究的物体	(5)
1.4 杆件的实用变形形式及其相应的内力	(7)
1.5 应变概念及变形的基本形式	(8)
1.6 工程常用材料的主要力学性质	(9)
2. 拉伸和压缩	(18)
2.1 内容导读	(18)
2.2 杆件拉伸或压缩时的强度计算·圣文南原理	(19)
2.3 杆件拉伸或压缩时的变形计算	(25)
2.4 拉伸或压缩中的静不定问题	(29)
2.5 应力集中概念	(36)
2.6 拉伸或压缩时斜截面上的应力	(37)
2.7 承拉构件连接件的实用计算	(38)
3. 剪切和扭转	(41)
3.1 内容导读	(41)
3.2 工程中的扭转问题	(42)
3.3 外力矩·扭矩	(42)
3.4 扭转实验	(45)
3.5 圆轴扭转时的应力	(49)
3.6 受扭圆轴的强度条件	(52)
3.7 受扭圆轴的变形及刚度条件	(53)
3.8 提高圆轴抗扭能力的途径	(55)
3.9 圆轴扭转时的变形能	(57)
3.10 密圈螺旋弹簧	(58)
3.11 矩形截面杆扭转简介	(60)
3.12 转轴连接件的实用计算	(61)
4. 应力和应变分析	(64)
4.1 内容导读	(64)
4.2 应力状态概念	(64)
4.3 二向应力状态分析	(65)
4.4 三向应力状态简介	(74)
4.5 广义虎克定律	(76)

4.6 复杂应力状态下的变形比能·····	(78)
5. 强度理论·····	(81)
5.1 内容导读·····	(81)
5.2 强度理论概述·····	(81)
5.3 四个常用的强度理论·····	(82)
6. 梁弯曲时的剪力和弯矩·····	(86)
6.1 内容导读·····	(86)
6.2 弯曲的概念·····	(88)
6.3 梁弯曲时的内力——剪力与弯矩·····	(89)
6.4 剪力图与弯矩图·····	(91)
6.5 剪力、弯矩和载荷集度间的关系·····	(96)
6.6 按迭加法作内力图·····	(99)
6.7 平面刚架和平面曲杆的内力·····	(100)
7. 梁弯曲时的强度计算·····	(102)
7.1 内容导读·····	(102)
7.2 纯弯曲时的正应力及单向应力状态下的强度计算·····	(104)
7.3 横力弯曲时的应力·····	(110)
7.4 横力弯曲时的强度计算及提高抗弯能力的措施·····	(116)
7.5 异料组合梁·····	(126)
7.6 梁弯曲时的变形能·····	(129)
8. 组合变形的强度计算·····	(130)
8.1 内容导读·····	(130)
8.2 组合变形的概念·····	(130)
8.3 斜弯曲·····	(131)
8.4 拉伸(或压缩)与弯曲的组合·····	(134)
8.5 偏心压缩和截面核心·····	(138)
8.6 扭转与弯曲的组合·····	(140)
9. 疲劳强度计算·····	(145)
9.1 内容导读·····	(145)
9.2 基本概念·····	(146)
9.3 材料的持久极限及其影响因素·····	(150)
9.4 对称循环时的疲劳强度·····	(154)
9.5 非对称循环时的疲劳强度·····	(155)
9.6 提高疲劳强度的途径·····	(160)
10. 杆件的刚度计算·····	(161)
10.1 内容导读·····	(161)
10.2 横力作用下梁的刚度计算·····	(164)
10.3 任意载荷作用下结构的刚度计算——能量法·····	(184)
10.4 用能量法求解静不定结构·····	(193)
11. 压杆的稳定计算·····	(200)

11.1	内容导读	(200)
11.2	压杆稳定的概念	(201)
11.3	临界力及临界应力	(202)
11.4	临界应力总图	(207)
11.5	压杆的稳定计算	(209)
11.6	提高压杆稳定能力的措施	(211)
12.	圆板与薄壳	(214)
12.1	内容导读	(214)
12.2	概述	(214)
12.3	轴对称载荷作用下圆板的弯曲	(215)
12.4	圆板弯曲时应力和挠度的确定	(219)
12.5	薄壳的应力计算	(224)
12.6	无力矩理论对几种常见壳体的应用	(225)
12.7	有力矩理论的基本概念	(228)
12.8	圆筒形薄壁容器稳定问题简介	(230)
13.	厚壁圆筒与旋转圆盘	(231)
13.1	内容导读	(231)
13.2	概述	(231)
13.3	厚壁圆筒的应力计算	(232)
13.4	改善厚壁圆筒应力分布的途径	(236)
13.5	厚壁容器的强度计算	(237)
13.6	旋转圆盘	(240)
14.	冲击载荷	(242)
14.1	内容导读	(242)
14.2	冲击载荷的概念	(242)
14.3	轴向冲击	(243)
14.4	轴的扭转冲击	(248)
14.5	梁的横向冲击	(249)
附录 I	常用图形的几何性质	(252)
附录 II	型钢表	(253)
	主要参考资料	(261)

1 基本概念

1.1 内容导读

1.1.1 理论概要

1. 构件:构成机器、设备或结构的元件称为构件。
2. 外力与载荷:构件受到来自其它物体的作用力称为外力。与约束无关的外力称为载荷。
3. 变形:构件承受载荷后,其尺寸和形状的改变称为变形。
4. 弹性变形及弹性:承载构件若除去载荷后,能够消失的变形称为弹性变形。材料具有弹性变形的性质称为弹性。
5. 塑性变形及塑性:承载构件若除去载荷后,不能消失的变形称为塑性变形。材料具有塑性变形的性质称为塑性。
6. 小变形假设:承载构件,其变形量的大小远小于构件的原始尺寸,当变形量与构件的原始尺寸相比时可以忽略不计,这样的变形称为小变形假设。
7. 内力:由于构件的外部原因(如载荷或温差)所引起构件内部的相互作用力称为内力。
8. 截面法:确定承载构件截面上内力合力的方法称为截面法。
9. 应力:围绕某点在所论平面上,单位面积的内力称为该面上的平均应力。当所论平面趋于该点时,平均应力的极限值称为该点的应力。
10. 正应力:垂直于所在截面的应力称为正应力,以 σ 表示。
11. 剪应力:方向沿着所在截面的应力称为剪应力,以 τ 表示。
12. 强度:承载构件抵抗破坏的能力称为强度。
13. 刚度:承载构件抵抗弹性变形的能力称为刚度。
14. 稳定性:承载构件保持其原有形状下的平衡能力称为稳定性。
15. 杆:横向尺寸远小于纵向尺寸的构件称为杆。
16. 杆的横截面:垂直于杆纵向尺寸的截面称为杆的横截面。
17. 杆的轴线:杆的横截面形心的连线称为杆的轴线。
18. 板:一向尺寸远小于其它两向尺寸的构件称为板。
19. 板的中面:板内与上、下表面距离相等的平面称为板的中面。
20. 壳:一向尺寸远小于其它两向尺寸的构件,且中面为曲面的构件称为壳。
21. 应变:由某点沿所论方向上,线段的单位长度的伸长或缩短称为该线段的平均应变。当所论线段趋于该点时,平均应变的极限值称为该点沿所论方向的线应变或简称应变,以 ϵ 表示。
22. 剪应变:在所论平面内,当过某点的两正交线段均趋于该点时,其夹角改变量的极限值称为所论平面在该点的剪应变或角应变,以 γ 表示。
23. 材料的力学性质:在载荷作用下,材料的强度和变形等方面所表现的固有性质称为材料的力学性质。如材料的强度指标、刚性指标、塑性指标、韧性指标等。
24. 材料的延伸率:承受拉伸实验的材料,断后塑性应变的百分比称为材料的延伸率,它标志着材料产生塑性变形的能力,是材料的塑性指标,以 δ 表示。

25. 塑性材料: 延伸率 $\delta > 5\%$ 的材料称为塑性材料。如低碳钢、合金钢、铝、铜等。

26. 脆性材料: 延伸率 $\delta < 5\%$ 的材料称为脆性材料。如铸铁、石料、混凝土等。

27. 材料的比例极限: 在拉伸和压缩实验中, 材料应力与应变成正比时的最高应力称为材料的比例极限, 以 σ_p 表示。它是材料的强度指标之一。

28. 材料的弹性极限: 在拉伸和压缩实验中, 材料产生弹性变形时的最高应力称为材料的弹性极限, 以 σ_e 表示。它是材料的强度指标之一。

29. 材料的屈服极限: 在拉伸和压缩实验中, 材料处于屈服阶段的最低应力称为材料的屈服极限, 以 σ_s 表示。它是材料的重要强度指标之一。对于没有明显屈服极限的塑性材料是以产生 0.2% 塑性应变时的应力 $\sigma_{0.2}$ 作为屈服极限。

30. 材料的强度极限: 在拉伸和压缩实验中, 材料承受的最高应力称为材料的强度极限, 以 σ_b 表示。它是材料的重要强度指标之一。

31. 材料的弹性模量: 在拉伸实验中, 处于弹性变形范围内的材料, 其应力、应变图线的斜率称为材料的弹性模量, 以 E 表示。它是表征材料抵抗弹性变形的能力, 所以是材料的刚性指标。 E 又称为杨氏模量, 它是英国科学家托马斯·杨(Thomas·Young, 1773~1829)于 1807 年提出的。

32. 虎克定律: 处于弹性变形范围内的材料, 其应力与应变成正比, 即 $\sigma = E\epsilon$, 它是由英国科学家罗伯特·虎克(Robert·Hooke, 1635~1703)于 1678 年提出的。

33. 材料的冲击韧性: 是材料抵抗冲击的能力, 是材料的韧性指标, 以 α_k 表示。

34. 拉伸(或压缩)变形比能 $u = \frac{1}{2}\sigma\epsilon = \frac{1}{2}\frac{\sigma^2}{E}$

1.1.2 方法指导

1. 由于本书是对构件建立应力、应变的分析方法, 并研究构件的强度、刚度、稳定性的科学, 因而我们阐述的变形固体、截面法、内力、应力、应变等都是很重要的概念, 必须很好地掌握它们, 以便为今后的学习打下良好的基础。

2. 希望读者对待上述概念要采取辩证唯物论的观点, 因为我们在阐述这些概念时, 采取了微观与宏观相结合的方法。微观分析的目的一是为了与其它学科沟通, 再是为了从宏观上加深上述概念的理解, 因为本书毕竟是从宏观的角度对变形固体加以研究的。

3. 材料的力学性质研究是本书建立计算方法及其失效判据的重要依据。材料的力学性质是通过实验获得的, 其中静荷、常温下, 拉伸实验、压缩试验、冲击实验是获取材料的力学性质的三个重要的实验。

由于低碳钢是工程上最常用的材料之一, 而且它在拉伸实验过程中的力学性质又较全面, 因而我们以低碳钢为典型代表来讲授这一实验, 希望读者通过低碳钢拉伸实验的应力、应变图很好地理解材料的强度指标(σ_p 、 σ_e 、 σ_s 、 σ_b)、刚性指标(如 E)、塑性指标(δ 、 φ)、及冲击韧性 α_k 。

工程上按延伸率 δ 将材料分为塑性材料($\delta > 5\%$)及脆性材料($\delta < 5\%$)。塑性材料是以低碳钢为典型代表, 脆性材料是以铸铁为典型代表, 塑性材料在断裂前有显著的塑性变形, 由于工程结构一般不允许产生塑性变形, 因而对塑性材料制成的构件是以屈服极限 σ_s 作为材料强度失效的判据。脆性材料断裂前无屈服阶段、无显著的塑性变形, 因而对脆性材料制成的构件是以强度极限 σ_b 作为材料强度失效的判据。所以屈服极限 σ_s 、强度极限 σ_b 是材料的两个重要的强度指标。

4. 截面法是确定承载构件内力合力的方法, 它的关键是用假想的平面截开构件上欲求内力处的部位(只有截开构件, 其内力才能出现), 而后保留其中部分构件平衡求解(只有保持部分构件平衡, 才能定出内力的大小)的方法, 这一方法贯穿本书始终, 希望读者能很好地掌握它。

1.2 构件的失效及内力、应力概念

工程上所用的机器、设备或结构都是由各种元件(即不能再拆的部分)装配而成的,我们将构成机器、设备或结构的元件称为构件。构件受到来自其它物体的作用力称为外力,一种外力是限制构件在空间的位置,这种限制称为约束,而这种外力称为约束力。我们将与约束力无关的外力称为载荷。一般载荷是已知的,可称为主动力(而约束力往往随着载荷的存在而存在)。载荷按作用方式可分为集中力载荷,如轴承中的滚珠受到压力的面积很小,可视为集中于一点,其单位是牛顿,以 N 表示。分布力载荷,如闸门受到的水压力,其单位是 N/m^2 或称帕斯卡(简称帕),以 Pa 表示。体积力载荷,如自重,单位是 N/m^3 。若载荷按随时间变化的情况划分,又可分为静载荷和动载荷。所谓静载荷是构件的载荷由零缓慢地增加到某一值后保持不变或变动缓慢。而动载荷则是载荷随时间而变化,其中若载荷随时间作周期变化称为交变载荷,而在极短时间内使构件产生极大加速度的载荷称为冲击载荷。构件在服役过程中,除承受载荷或传递运动外,同时将执行设计机器、设备或结构时所赋予各个构件的功能。比如起重机的钢索需要将额定的重物安全地吊起,图 1-1(a);车床的主轴将传递力矩对工件进行切削,图 1-2;而千斤顶则需将重物安全地抬起,

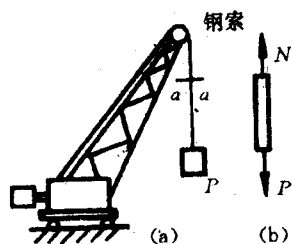


图 1-1

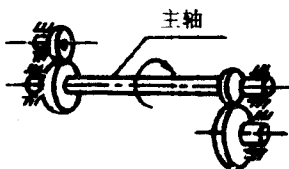


图 1-2

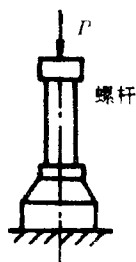


图 1-3

图 1-3。构件在服役过程中本身也将产生一些变化,如尺寸、形状的改变,甚至断裂。实验指出,无论什么材料制成的构件承受载荷后,其尺寸和形状均要发生改变,我们将这种改变称为变形。若除去载荷后,能够消失的变形称为弹性变形,材料具有弹性变形的性质称为弹性。若除去载荷后,物件不能消失的变形称为塑性变形,材料具有塑性变形的能力称为塑性。承载构件为了维持其原有的尺寸和形状,在材料内部相互之间必定产生反抗力,这种由于载荷所引起的材料内部的相互作用力我们称为内力。内力及其在截面各点上的强弱程度或集度与构件变形的大小及材料是否安全密切相关,因而计算内力及其集度是本书至关重要的问题之一。若我们要计算图 1-1(a)钢索中任一截面 $a-a$ 处的内力,方法如下:

1. 何处求力,何处截开。我们用假想的平面沿 $a-a$ 面将钢索截开。
2. 弃去一部,内力替代。保留钢索的下半部,将钢索的上半部弃去,则弃去部分对钢索保留部分的作用,用 $a-a$ 面上分布力系的合力 N 来代替,图 1-1(b)。
3. 保留部分,平衡求解。由于钢索原处于平衡状态,所以对于钢索的保留部分也必须保持平衡状态,即 $\sum Y=0$,

$$N - P = 0$$

$$\therefore N = P$$

上述确定承载构件截面上内力合力的方法称为截面法。

一般情况下,内力在截面上的分布是不均匀的,为了说明内力系在截面上的强弱程度,我们引入应力概念,设图 1-4(a)为承载构件的某一截面,在此面上围绕 C 点取微面积 ΔA ,其上的内力为 ΔP ,则

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

称为 ΔA 上的平均应力,而

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA} \quad (1-1)$$

称为该截面上 C 点的应力。

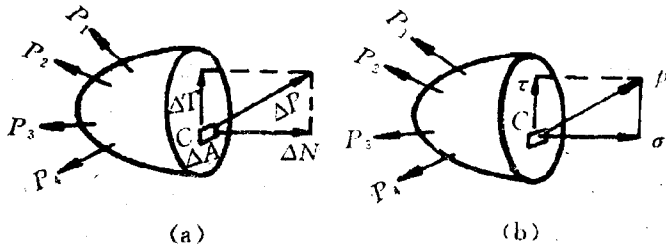


图 1-4

设 ΔP 沿截面法线方向的分量及沿截面切线方向的分量分别为 ΔN 、 ΔT , 则

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta A} = \frac{dN}{dA} \quad (1-2)$$

称为该截面上 C 点的正应力。

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} = \frac{dT}{dA} \quad (1-3)$$

称为该截面上 C 点的剪应力,图 1-4(b)

应力的单位是帕(Pa),工程实际中常用千帕($1\text{kPa} = 10^3\text{Pa}$)、兆帕($1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$)或吉帕($1\text{GPa} = 10^9\text{Pa}$)。

实验指出,承载构件当载荷增加时,应力也随之增加,但应力不能无限地增加,对于某种材料来说有一确定的界限值,当应力达到这一界限值时,构件就要丧失其规定的功能,或不能继续工作,或不能安全可靠地工作,这些现象均称为失效,显然,构件产生塑性变形或破裂将视为失效,如起重机的钢索产生塑性变形或破裂就不能继续使用。在其它情况下,构件的失效还会以另外的形式表现出来,如车床主轴在服役过程中产生过大的弹性变形将会影响工件的加工精度,而对于象千斤顶那样承压的较细长的螺杆来说,当压力 P 达到某一数值后,若螺杆再受到方向垂直于轴线的干扰力时,将会丧失原有的平衡形式而突然变弯,我们将此现象称为丧失稳定或简称失稳,这也使构件无法继续工作。所以尽管各种构件的功能千差万别,然而为保证机器、设备或结构正常地工作,必须使组成它们的构件满足下列基本要求——

1. 足够的强度:保证承载构件不生塑性变形或破裂,即构件具有抵抗破坏的能力。
2. 足够的刚度:保证承载构件不生过大的弹性变形,即构件具有抵抗变形的能力。
3. 足够的稳定性:保证承压构件不致突然失去原有的平衡形式,即承压构件具有保持原有平衡形式的能力。

要保证构件的上述要求很容易想到选用优质材料,或加大构件尺寸,但这受到经济法则的制约,为了节省资金,降低材料消耗,则要求选用价廉材料,并使构件尺寸适当。本书正是解决这一矛盾的科学,它是研究各种材料承载时所表现的力学性质,从而指出如何从构件的材料及尺寸方面来保证构件满足既安全又经济的要求,同时本书所阐述的基本概念与应力、应变分析又是其它相关学科(如结构力学、弹性力学、金属学等)的基础。

1.3 应用材料力学所研究的物体

1.3.1 变形固体的变形机理

应用材料力学所研究的物体都是可变形的固体,这种固体称为变形固体,如工程上经常使用的金属就是变形固体。为了了解变形固体的变形机理,我们以金属为例进行微观分析。

金属是由许多晶体组成的,原子按一定的点阵结构有规则地排列形成所谓晶格,晶格的重复堆砌就形成了晶体,图 1-5 是体心立方晶格组成的铁在室温下的晶体结构。组成晶体的原子间存在着相互平衡的力——吸力与斥力,吸力使原子彼此密合到一起,而短程斥力则使原子间保持一定的距离。在正常情况下,原子占据的是这两种力保持平衡的位置。当施加外力时,原子内的这种平衡被破坏,为了建立新的平衡,原子便需对原在位置作稍许的移动,而吸力或斥力相应地产生了附加的成份,(即我们在 1.2 节中所讲的内力。)以期与外力建立新的平衡。当外力一旦取消,内力亦随之消失,原子重新回到原有的平衡位置,在宏观上就显示出除去外力后恢复原状的弹性变形,由此可见,外力可使晶体变形,而内力则是反抗变形。

进一步的分析指出,承受外力的晶体若沿某一晶面 $a-a$ 产生了正应力 σ 与剪应力 τ ,图 1-6, σ 欲使 $a-a$ 面上的原子与图中毗邻的平行面上的原子沿 $a-a$ 面的法线方向拉开,而剪应力 τ 则使 $a-a$ 面上的原子沿 $a-a$ 面与图中毗邻的平行面上的原子彼此切移。在弹性范围内,正应力 σ 和剪应力 τ 都可以使晶体产生弹性变形,如果剪应力 τ 超过了某一界限值时,晶体就要沿剪应力 τ 所在的截面发生滑移,即产生了塑性变形。

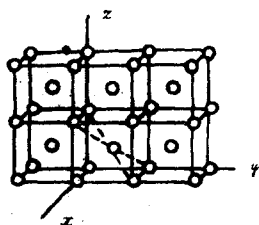


图 1-5

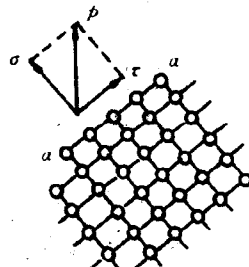


图 1-6

工程上所使用的金属是由数量众多的晶体组成,晶体的大小与金属相比极其微小,而且它们在金属中的排列又极不规则,因此金属的性质是晶体性质的大量统计平均的结果,然而正应力 σ 和剪应力 τ 对材料所起的作用与它们对晶体的作用是一致的,即正应力 σ 使所在点处的材料沿截面法线方向拉开,而剪应力 τ 则使所在点处的材料沿截面切线方向滑移。

1.3.2 变形固体的构成假设

上面我们对工程中最常用的固体——金属由微观结构到宏观构成作了概括的阐述。考虑到本书所研究的内容是构件在宏观上的应力、应变分析,及其强度、刚度、稳定问题,因而我们将变形固体的构成假设为如下的理想模型——

1. 连续性

本书所研究的变形固体在占据的几何空间内毫无间隙地充满了物质,因而变形固体内的一些物理量(如位移、应力等)是连续的,可用坐标的连续函数来表达它们的变化规律。

2. 均匀性

所谓均匀性是指变形固体在占据的几何空间内的物质均由同一材料组成,且疏密情况相同,所以变形固体内各点的力学性质彼此相同,不随坐标位置的变化而变化。

3. 各向同性

各向同性是认为占据变形固体几何空间内的物质在各个方向均具有相同的力学性质,即变形固体的力学性质不随方向的变化而变化。

我们对上述假设下的变形固体所进行的应力、应变分析,可以得到较为符合实际情况的结果。

1.3.3 变形固体的几何特点

本书所研究的变形固体就是构成机器、设备或结构的构件,尽管这些构件的形状是多种多样的,如发动机的连杆、蒸馏塔中的塔板及储藏流体的容器等等,但我们可按其几何特点归结为杆、板、壳三种基本形状:

1. 杆

杆是指具有细长形状的构件,如梁、轴、柱等都称为杆,其几何特点为横向尺寸远小于纵向尺寸,图 1-7(a)。垂直于杆长度方向的截面称为横截面。

横截面的形心 C 定义为(见图 1-8):

$$y_c = \frac{S_z}{A}, \quad z_c = \frac{S_y}{A} \quad (1-4)$$

式中 A 为横截面面积。

$$S_y = \int_A z dA, \quad S_z = \int_A y dA \quad (1-5)$$

分别称为图形(横截面)对 y 轴和 z 轴的静矩。

横截面形心的连线称为杆件的轴线,如图 1-7(a)中,以 x 表示杆的轴线。

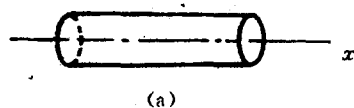
2. 板

板是指一向尺寸远小于其它两向尺寸的构件,如建筑中的楼板、设备的端盖、活塞的底板等。在板内与上、下表面距离相等的平面称为中面,如图 1-7(b)所示。

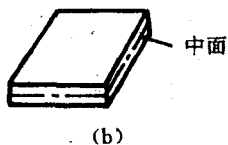
3. 壳

壳的几何特点是一向尺寸远小于其它两向的尺寸,而其中面为一曲面的构件,图 1-7(c),工程上所用的容器、储罐、反应釜等均可归结为壳。

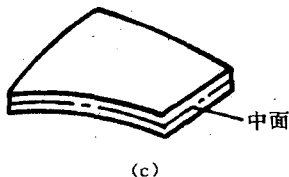
本书研究的主要内容是杆,兼论板与壳的某些典型的问题。



(a)



(b)



(c)

图 1-7

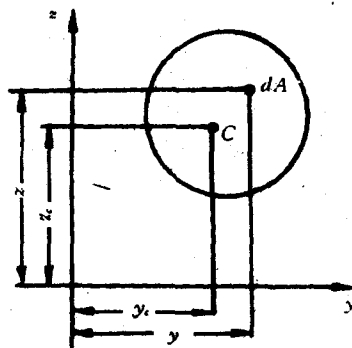


图 1-8

1.4 杆件的实用变形形式及相应的内力

杆件在工程实践中可能承受多种多样的载荷, 所以其大小、形状的改变也将是形态各异, 我们从工程实用的观点出发, 将工程实践中承载杆件大小、形状的改变归纳为下述四种形式, 此即杆件的实用变形形式。

1.4.1 拉伸或压缩

杆件两端受到大小相等、方向相反、作用线与杆件轴线重合的两力作用, 在这一对力的作用下, 杆件的轴线将伸长或缩短, 这种实用变形称为拉伸或压缩, 图 1-9(a) (压缩则是两力 P 指向横截面), 例如简易起重机两端铰接的斜杆 AB 就是这种实用变形, 图 1-9(b)。

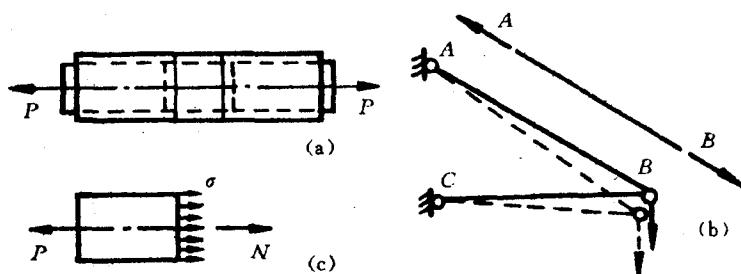


图 1-9

我们设想杆由许多纵向纤维组成, 当杆承受拉伸时, 其形状由实线变为虚线, 图 1-9(a), 杆表面给出的横向直线也由实线 ab 、 cd 分别平移到虚线 $a'b'$ 、 $c'd'$, 由此可作出假设: 杆件变形后, 横截面仍为平面, 此称平面假设。根据截面法, 我们用平面将杆沿 ab 截开, 保留左段, 图 1-9(c), 使其平衡, $\sum X = 0$

$$\therefore N = P$$

由于 N 沿着杆件的轴线方向, N 也称为轴力。再由平面假设可以得出, 杆上与横截面垂直的纵向纤维伸长相同, 根据材料的均匀性, 因此得出垂直横截面的应力是均匀分布的, 即:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{P}{A} \quad (1-6)$$

式中 A 为杆的横截面面积, 且规定 N 为拉取正号, N 为压取负号

1.4.2 剪切

杆件轴线的垂直方向受到大小相等、方向相反、作用线极近的一对力的作用, 在这一对力的作用下, 两力之间的截面将有相互错动的趋势, 图 1-10(a), 这种实用变形称为剪切。两力之间的截面 nn 称为剪切面。例如受剪切的钢筋就是这种实用变形。为了考查剪切面上的内力, 我们按照截面法沿剪切面 nn 将杆件截开, 保留左段, 图 1-10(b), 使其平衡, $\sum Y = 0$, $\therefore Q = P$

我们将在截面上的内力 Q 称为剪力, 剪力 Q 是剪切面上分布力系的合力, 它在剪切面上各点的集度是剪应力 τ 。

1.4.3 扭转

杆件两端受到大小相等、方向相反、矢量沿杆轴线的一对力偶矩的作用, 在这一对力偶矩作用下, 杆件表面的圆周线相互转动, 而纵向直线发生倾斜 (倾斜角为 γ), 图 1-11(a), 这种实用变形称为扭转。由图可见, 变形前杆件表面上的矩形网格 $abcd$, 变形后变成为菱形网格 $a'b'c'd'$ 。例如机械中的传动轴就是这种实用变形。为了考查横截面上的内力, 我们按照截面法沿横截面 ad 将杆件截开, 保留左段, 图 1-11(b), 使其平衡, $\sum m_x = 0$, $\therefore M_x = m$

我们将截面上的内力偶矩 M_x 称为扭矩, 扭矩 M_x 是截面上内力系的合力偶矩, 它是截面上的

剪应力 τ 形成的。

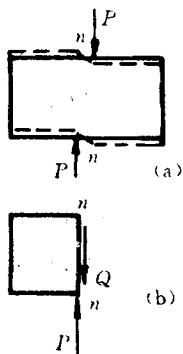


图 1-10

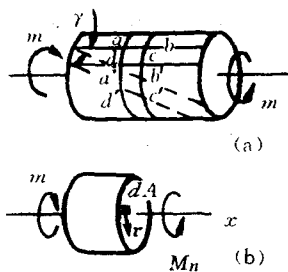


图 1-11

1.4.4 弯曲

杆件受到矢量垂直于其轴线的外力(力偶矩

由其矢量表示)的作用,在这样的外力作用下,杆件的轴线由直线变为曲线,图 1-12(a),例如刨刀杆工作时受以来自工件的反抗力 P 就是这种实用变形,图 1-12(b),为了考查横截面上的内力,我们按照截面法沿横截面 x 将杆件截开,保留左段,图 1-12(c),使其平衡,

$$\begin{aligned}\Sigma Y &= 0 & \therefore Q &= P \\ \Sigma m_x &= 0 & \therefore M &= Px\end{aligned}$$

我们将横截面上的内力 Q 称为剪力,剪力 Q 是横截面上分布力系的合力,它在横截面上各点的集度是剪应力 τ 。我们将横截面上内力偶矩 M 称为弯矩,弯矩 M 是横截面上分布力系的合力偶矩,它是由横截面上的正应力 σ 形成的。

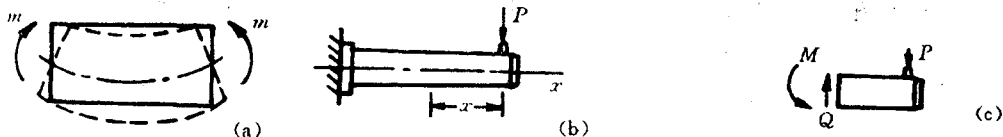


图 1-12

需要指出,在本书中所研究的杆件无论在变形前还是在变形后均认为处于平衡状态,而且无论处于何种实用变形情况下,其变形量的大小均远小于杆件的原始尺寸,因而当变形量与杆件的原始尺寸相比较时,变形量可以忽略不计,此称为小变形假设。如图 1-9(b)中,杆 AB 和杆 BC 在载荷 P 的作用下产生的变形极其微小,于是载荷作用点 B 的水平位移和垂直位移也是微小的量,所以当建立节点 B 在各杆的内力和外力的平衡方程时,仍可认为两杆处于变形前的位置,即图中实线所示的位置。

1.5 应变概念及变形的基本形式

上节(1.4 节)指出,杆件的变形无论是那种实用形式均将使杆件的大小、形状发生改变,为了定量描述这些量的变化,我们可以设想杆件由无数微小正六面体——称单元体——组成,图 1-13(a),当整个杆件变形时,它所包含的所有单元体也将随之变形,但杆件的变形无论是怎样的实用形式,单元体的变形只有两种情况,即各棱边长度的改变和棱边间角度的改变。

设由承载杆内某点取出一单元体,其左、右侧面上作用着拉应力 σ ,图 1-13(b),棱边 AB 原长

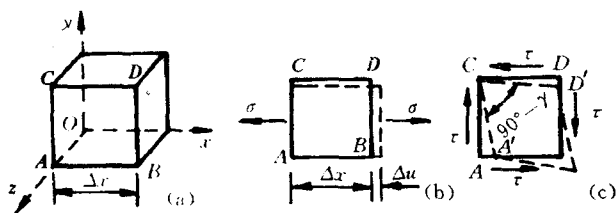


图 1-13

为 Δx ; 变形后其伸长(若 σ 为压应力, 则 Δu 为缩短) Δu 称为 AB 的绝对伸长(或绝对缩短), 比值

$$\epsilon_m = \frac{\Delta u}{\Delta x} \quad (1-7)$$

表示线段 AB 每单位长度的平均伸长(或缩短)称为线段 AB 的平均应变, 若线段 AB 的长度趋于零, 则比值 ϵ_m 的极限

$$\epsilon_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{du}{dx} \quad (1-8)$$

称为 A 点沿 x 方向的线应变, 简称应变, 同理可以表达沿坐标轴 y, z 方向的应变 ϵ_y, ϵ_z 。

显然由拉伸或压缩的杆件上取一单元体即如图 1-13(b) 所示, 不过杆件拉伸或压缩时, 各横截面上的正应力都是均匀分布的, 所以其应变

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{l_1 - l}{l} \quad (1-9)$$

式中 l, l_1 分别为杆件变形前、后的长度。

杆件承载后, 由其上截取的单元体不仅棱边长度发生变化, 而且正交棱边的直角也发生变化, 设由承载杆件内某点取出一单元体, 其左、右侧面及上、下端面作用着剪应力 τ , 图 1-13(c), 使正交棱边 CD, CA 所夹直角的改变量

$$\gamma_{xy} = \lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ \Delta y \rightarrow 0}} \left(\frac{\pi}{2} - \angle A'CD' \right) \quad (1-10)$$

称为 xy 平面上 A 点的角应变或剪应变, 以弧度(rad)度量, 规定使 $\angle ACD$ 减少的剪应变为负。同理可以表达 xz, yz 平面上的剪应变。

显然由承扭杆件横截面上取出的单元体(如图 1-11(a) $abcd$ 所示)变形后(如图 1-11(a) $a'b'c'd'$ 所示)即如图 1-13(c) 所示。

应变 ϵ 和剪应变 γ 都是微小的量, 又都没有量纲, 它们是表示承载构件某点处变形程度的基本形式, 构件无论产生如何复杂的变形, 从力学的观点看都可归结为这两种基本的变形形式或是这两种基本形式的组合, 如弯曲变形, 一般情况下由横截面取出一单元体, 其左、右侧面上既有正应力 σ 、又有剪应力 τ , 其变形即为图 1-13(b)、(c) 两种基本情况的组合。

1.6 工程常用材料的主要力学性质

1.6.1 概述

工程上所用的机器或设备往往根据不同的需要采用不同的材料, 如厂房建筑中的梁和柱主要由结构钢制成。在汽车工业中钢被大量采用, 如车身多用普通碳钢。在机械制造中的轴、连杆、齿轮多采用高强度合金钢。而铸铁则用于发动机的底座、刹车轮鼓和气缸端盖。铝多用于化工容器的蒸发釜、泵用压铸的底座。钛则常用于飞机构件和压力容器等等。为什么上述构件对材料作出这样的选择呢? 这类问题只有了解了材料在载荷作用下, 其强度和变形等方面所表现的固有性能即材料的

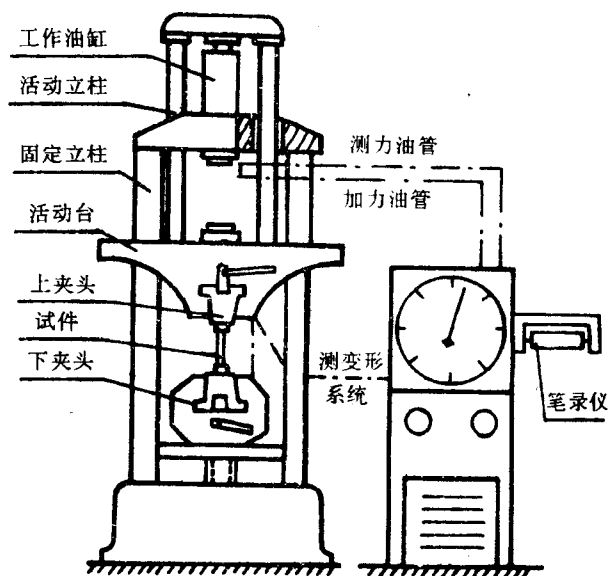


图 1-14

力学性质才能得到明确的答案。所以我们学习材料的力学性质的第一个目的就是根据机器式设备工作时的受力特点,优选材料,使材料的力学性能得以扬长避短充分发挥作用。

构件的材料选定之后,就要确定构件的形状和尺寸,由 1.2 节可知构件的形状和尺寸必须满足强度、刚度或稳定性等要求,这就需要了解载荷对于构件上材料的应力和应变的发展有着怎样的影响? 应力和变形有着怎样的关系? 以及该材料可以承受多大的载荷而不发生过大的弹性变形或破坏? 这只有了解了材料的力学性质才能建立起我们的计算方法,并给出构件失效与否的判据。

材料的力学性质是按照国家标准将材料制成标准试件,在试验机上进行实验获取的。材料的主要力学性质是在室温下,通过拉伸实验、压缩实验、冲击实验得到的。拉伸或压缩实验机如图 1-14 所示。压缩试件是一圆柱体,其高度 H 与横截面直径 d 之比为 $1 \leq \frac{H}{d} \leq 3$ 。拉伸试件其截面一般采用圆形(按规定也可为矩形),直径为 d ,其长度 l 称为标距,供测量拉伸变形用,两者之间的关系规定为 $l=5d$ 或 $l=10d$ 如图 1-15 所示。实验时将拉伸(或压缩)试件置于试验机的上、下夹头(或上、下压头)之间,缓慢加力,拉力(或压力) P 由实验机示力盘读出,而试件的伸长(或缩短) Δl 可由变形仪表测取。

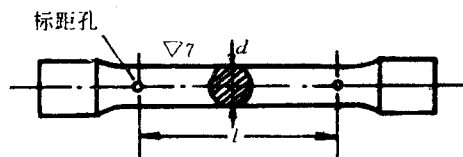


图 1-15

1.6.2 常用材料的主要力学性质

1. 材料拉伸时的力学性质

钢材是建筑、桥梁、机械制造中广泛使用材料,按其品质钢材可分为普通钢和优质钢。普通钢中的成份主要由铁素体、含碳量及磷、硫等杂质组成,这类钢主要用做建筑结构或要求不高的机械零件,如工程上常用的低碳钢及低合金结构钢。低碳钢中的含碳量不超过 0.25%,而杂质硫不超过 0.055%,磷不超过 0.045%,其中的 A 类用牌号 Ax 表示, x 示出这类钢的序号,即 $x=1,2,\dots,7$,序号越大,钢中的平均含碳量也在增大。低合金结构钢其中尚含有合金元素,如牌号 16Mn,表示含锰