

配合主教材严圣平主编《材料力学》(第1版)

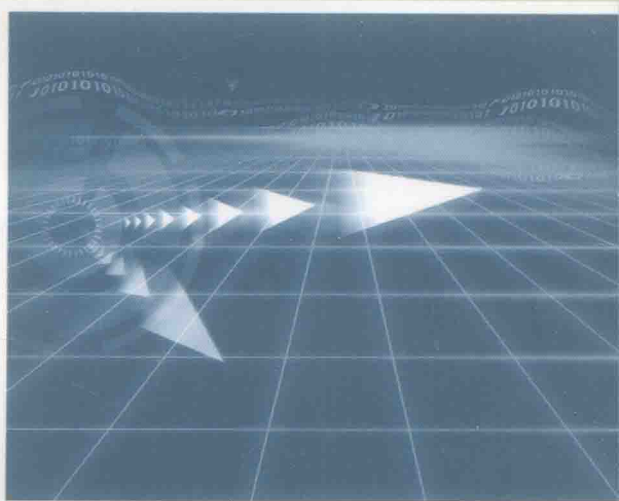
材料力学

学习指导与题解

严圣平 马占国 钟卫平 杨 静 编著

Cailiao Lixue
Xuexi Zhidao Yu Tijie

China University of Mining and Technology Press



中国矿业大学出版社

配合主教材严圣平主编《材料力学》(第1版)

材料力学学习指导与题解

严圣平 马占国
钟卫平 杨 静 编著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是严圣平主编《材料力学》(第1版)的配套教材,对全书的12章内容按章编写了基本要求、内容概要、习题详解,另附三套模拟试卷。该书旨在帮助读者了解课程基本要求,理解基本概念,学会分析方法,提高解题能力。

本书可供学习材料力学的学生和自学人员使用,也可供讲授材料力学课程的教师参考。尤其是书中量大面广的习题详解,对报考硕士研究生和参加相关学科竞赛的同学更有帮助。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学学习指导与题解/严圣平等编著. —徐州:
中国矿业大学出版社, 2014. 5
ISBN 978-7-5646-2349-4

I. ①材… II. ①严… III. ①材料力学—高等学校—教学参考资料 IV. ①TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 111761 号

书 名 材料力学学习指导与题解
编 著 严圣平 马占国 钟卫平 杨 静
责任编辑 陈 慧
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 江苏淮阴新华印刷厂
开 本 787×960 1/16 印张 15 字数 278 千字
版次印次 2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷
定 价 27.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 基本要求	1
1.2 内容概要	1
第 2 章 拉伸、压缩与剪切	4
2.1 基本要求	4
2.2 内容概要	4
2.3 习题详解	7
第 3 章 扭转	39
3.1 基本要求	39
3.2 内容概要	39
3.3 习题详解	41
第 4 章 平面图形的几何性质	53
4.1 基本要求	53
4.2 内容概要	53
4.3 习题详解	55
第 5 章 弯曲内力	63
5.1 基本要求	63
5.2 内容概要	63
5.3 习题详解	65
第 6 章 弯曲应力	75
6.1 基本要求	75
6.2 内容概要	75
6.3 习题详解	77
第 7 章 弯曲变形	95
7.1 基本要求	95
7.2 内容概要	95
7.3 习题详解	98

第 8 章 应力状态分析与强度理论	121
8.1 基本要求	121
8.2 内容概要	121
8.3 习题详解	125
第 9 章 组合变形	141
9.1 基本要求	141
9.2 内容概要	141
9.3 习题详解	143
第 10 章 压杆稳定	161
10.1 基本要求	161
10.2 内容概要	161
10.3 习题详解	164
第 11 章 动载荷 交变应力的概念	181
11.1 基本要求	181
11.2 内容概要	181
11.3 习题详解	184
第 12 章 能量法	195
12.1 基本要求	195
12.2 内容概要	195
12.3 习题详解	199
附录 模拟试卷	225
模拟试卷一	225
模拟试卷二	229
模拟试卷三	233

第1章 绪 论

1.1 基 本 要 求

- (1) 了解构件的强度、刚度和稳定性的基本概念,理解材料力学课程的主要任务。
- (2) 理解变形固体的基本假设、意义及其合理性。
- (3) 明确内力的概念,初步掌握用截面法计算杆件的内力。
- (4) 掌握正应力和切应力的概念。
- (5) 掌握正应变和切应变的概念。
- (6) 了解杆件变形的基本形式。

1.2 内 容 概 要

一、材料力学的任务

材料力学的任务是:在满足强度、刚度和稳定性的前提下,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。

二、变形固体及其基本假设

材料力学研究的构件都是变形固体,一般均假设具有连续性、均匀性和各向同性。另外,材料力学主要研究小变形的情形,即变形远小于构件的原始尺寸。

三、外力与内力的概念

作用于构件上的外力(载荷和约束力)按其作用方式可分为表面力和体积力。表面力是作用于物体表面上的力,又可分为分布力和集中力。体积力是连续分布于物体内部各点上的力。按随时间变化的情况,载荷又可分为静载荷和动载荷。

在外力作用下,构件内部各质点间相互作用力的改变量称为内力。

四、截面法和应力的概念

截面法是求构件内力的方法,在材料力学中占有非常重要的地位。利用截面法求内力的基本步骤为:

- (1) 欲求某一截面上的内力,就沿该截面假想把杆件分成两部分,留下其中一部分作为研究对象;
- (2) 用作用于截面上的内力代替弃去部分对留下部分的作用;
- (3) 建立留下部分的静力平衡方程,确定未知的内力。

在空间问题中,截面上的六个内力分量 F_x , F_y , F_z , M_x , M_y 和 M_z 如图 1.1 所示,杆段的静力平衡方程为:

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \\ \sum F_z = 0 \\ \sum M_x(F) = 0 \\ \sum M_y(F) = 0 \\ \sum M_z(F) = 0 \end{cases}$$

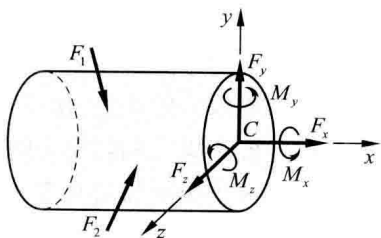


图 1.1

由此可以求出六个内力分量。

设在图 1.2a 所示受力构件的截面 $m-m$ 上,围绕点 k 取微小面积 ΔA , ΔA 上分布内力的合力为 ΔF ,则

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

定义为点 k 处的全应力。将 p 分解成垂直于截面的分量 σ 和切于截面的分量 τ (图 1.2b)。 σ 称为正应力,而 τ 称为切应力。应力是内力的集度,即单位面积上的内力。应力的量纲和压强的量纲相同,都是 $L^{-1}MT^{-2}$ 。但应力和压强的物理概念不同,压强是单位面积上的外力,而应力则是单位面积上的内力。应力的常用单位为 MPa, $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$ 。

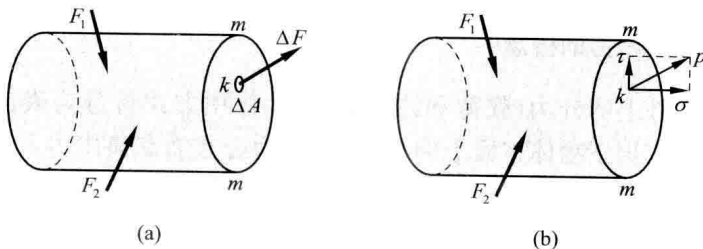


图 1.2

五、应变的概念

如图 1.3a 所示,在变形前构件内某点 A 沿 η 方向取长为 Δs 的线段 AB 。构件受力变形后,线段 AB 移动到新位置 $A'B'$,该线段的长度变为 $\Delta s + \Delta u$ 。则

$$\varepsilon = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta s}$$

称为点 A 沿 η 方向的线应变。

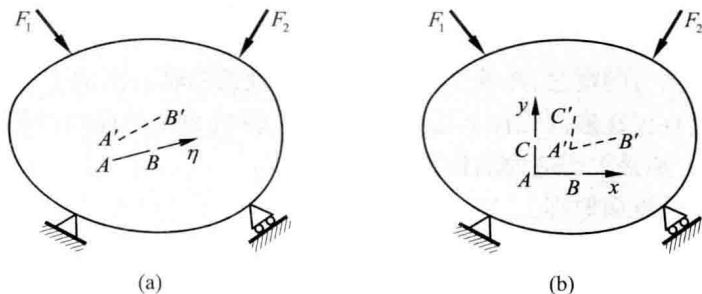


图 1.3

如图 1.3b 所示,在变形前构件内点 A 沿 x 方向取长为 dx 的线段 AB ,沿 y 方向取长为 dy 的线段 AC , AB 垂直于 AC 。构件变形后,线段 AB 移动到新位置 $A'B'$, AC 移动到新位置 $A'C'$,则 $\angle CAB$ 的改变量

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \angle C'A'B'$$

定义为点 A 在 xy 平面内的切应变或角应变。

线应变和切应变都是量纲一的量,线应变无单位,而切应变的单位为弧度。

六、杆件变形的形式

杆件的变形归纳为四种基本变形,分别是:

- (1) 轴向拉伸或压缩。杆受一对大小相等、方向相反的纵向力,力的作用线与杆轴线重合。
- (2) 剪切。杆受一对大小相等、方向相反的横向力,力的作用线靠得很近。
- (3) 扭转。杆受一对大小相等、方向相反的力偶,力偶作用面垂直于杆轴线。
- (4) 弯曲。杆受一对大小相等、方向相反的力偶,力偶作用面是包含轴线的纵向面。

第2章 拉伸、压缩与剪切

2.1 基本要求

- (1) 建立轴力的概念,熟练掌握轴力的计算及绘制轴力图的方法。
- (2) 掌握直杆在轴向拉伸与压缩时横截面、斜截面上的应力计算,尤其是杆内最大正应力和最大切应力的计算。
- (3) 了解圣维南原理。
- (4) 了解低碳钢和铸铁在拉伸与压缩时的力学性能指标、物理意义及其测试方法。
- (5) 了解安全因数及许用应力的确定。
- (6) 能熟练地运用强度条件进行强度校核、截面设计和许用载荷的计算。
- (7) 了解弹性模量 E 、泊松比 μ 和截面抗拉(压)刚度的概念,熟练掌握用胡克定律计算拉(压)杆变形的办法。
- (8) 掌握“用切线代替圆弧”求简单桁架节点位移的方法。
- (9) 了解超静定杆系的一般解法,熟练掌握一次超静定杆系(包括温度应力和装配应力)的解法。
- (10) 掌握应力集中的概念。
- (11) 掌握连接件剪切面和挤压面的判定方法,会综合运用拉(压)、剪切和挤压强度条件对连接件进行强度计算。

2.2 内容概要

一、轴向拉压杆的内力、应力和强度计算

轴向拉压杆横截面上的内力为轴力,用 F_N 表示。轴力 F_N 的符号规定为:拉伸为正,压缩为负。可采用截面法求轴力。用横坐标 x 表示横截面的位置,用纵坐标 F_N 表示相应截面上轴力的大小,可画出轴力图。

轴向拉压杆横截面上的正应力计算公式为

$$\sigma = \frac{F_N}{A}$$

若轴向拉压杆上任一斜截面与横截面的夹角为 α , 则斜截面上的应力为

$$\sigma_\alpha = \sigma \cos^2 \alpha, \quad \tau_\alpha = \frac{\sigma}{2} \sin 2\alpha$$

杆件轴向拉压时的强度条件为

$$\sigma = \frac{F_N}{A} \leq [\sigma]$$

根据上述强度条件, 可以进行三种类型的强度计算: ① 校核杆的强度; ② 设计杆的截面; ③ 确定杆的许可载荷。

二、轴向拉压杆的变形

杆件轴向拉伸(或压缩)时的伸长(或缩短)量可利用胡克定律求得

$$\Delta l = \frac{Fl}{EA}$$

式中, E 为材料的弹性模量, EA 为杆件的抗拉(压)刚度或拉压刚度。

如果横截面面积 A 沿轴线平缓变化, 或轴力 F_N 沿轴线变化, 利用下式积分可求得杆的伸长量

$$\Delta l = \int_l \frac{F_N(x) dx}{EA(x)}$$

杆件轴向拉压时的纵向线应变为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

上式为胡克定律的另一表达形式。而横向线应变为

$$\varepsilon' = -\mu \varepsilon$$

式中, μ 为泊松比, 是材料的弹性常数之一, 是量纲一的量。

三、圆筒形薄壁容器的应力

圆筒形薄壁容器, 内径为 D , 壁厚为 δ , 容器内充满压强为 p 的气体。容器横截面上的正应力 σ' 和纵截面上的正应力 σ'' 分别为

$$\sigma' = \frac{pD}{4\delta}, \quad \sigma'' = \frac{pD}{2\delta}$$

四、拉压超静定问题

求解超静定问题主要分为三个步骤: ① 先进行受力分析, 列出静力平衡方

程;② 根据变形协调条件及胡克定律列出补充方程;③ 联立求解静力平衡方程和补充方程。

对于静定结构,构件的加工误差不会引起应力。但对于超静定结构,加工误差却往往会引起装配应力。

长为 l 的杆,当温度升高 ΔT ,如果杆件不受约束而可以自由伸缩,则杆伸长

$$\Delta l_T = \alpha_l l \Delta T$$

式中, α_l 为材料的线胀系数。

在静定结构中,均匀的温度改变不会在构件内引起应力。但在超静定结构中,温度变化引起的变形受到约束,构件内将引起温度应力。

五、材料拉压时的力学性能

低碳钢拉伸时的应力-应变曲线如图 2.1 所示。变形分为四个阶段:弹性阶段($O \rightarrow a \rightarrow b$),屈服阶段($b \rightarrow c$),强化阶段($c \rightarrow d$),局部变形阶段($d \rightarrow e$)。有四个指标:比例极限 σ_p ,弹性极限 σ_e ,屈服极限 σ_s ,强度极限 σ_b 。

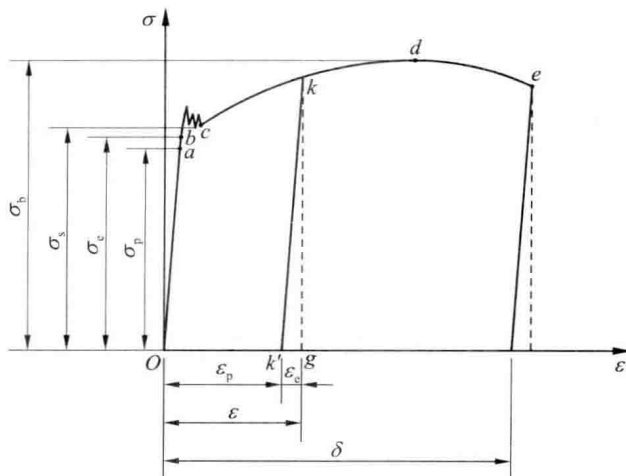


图 2.1

试样原标距长度为 l ,拉断后变为 l_1 ;试样原始横截面面积为 A ,拉断后颈缩处的最小横截面面积为 A_1 。材料的伸长率和断面收缩率为

$$\delta = \frac{l_1 - l}{l} \times 100\%, \quad \psi = \frac{A - A_1}{A} \times 100\%$$

低碳钢试样拉伸至强化阶段(图 2.1 中的 k 点),然后卸载。重新加载时,其比例极限提高,塑性降低,这种现象称为冷作硬化。

低碳钢压缩时的弹性模量 E 和屈服极限 σ_s , 都与拉伸时大致相同。屈服阶段之后, 试样越压越扁, 因而得不到压缩时的强度极限 σ_b 。

铸铁压缩时, 破坏断面的法线与轴线大致成 $45^\circ \sim 55^\circ$ 的倾角, 试样沿斜截面因相对错动而破坏。铸铁的抗压强度极限比其抗拉强度极限高 $4 \sim 5$ 倍。

六、剪切和挤压的实用计算

剪切强度条件为

$$\tau = \frac{F_s}{A} \leq [\tau]$$

式中, F_s 为剪切面上的剪力, A 为剪切面面积, $[\tau]$ 为材料的许用切应力。

挤压强度条件为

$$\sigma_{bs} = \frac{F_{bs}}{A_{bs}} \leq [\sigma_{bs}]$$

式中, F_{bs} 为挤压面上的挤压力, A_{bs} 为挤压面面积, $[\sigma_{bs}]$ 为材料的许用挤压应力。

2.3 习题详解

1. 试求图(a), (b), (c), (d)所示各杆 1-1, 2-2, 3-3 截面上的轴力, 并画出轴力图。

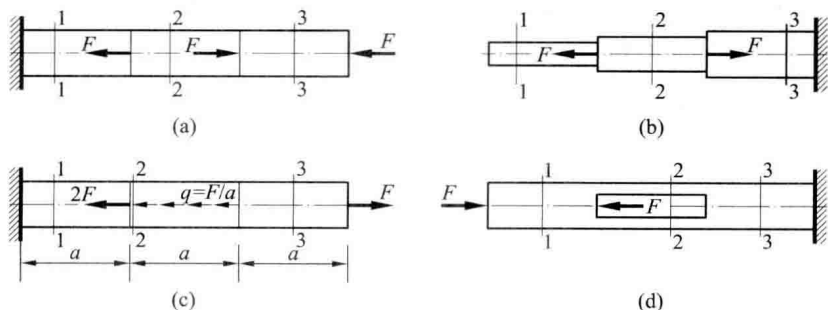
解: (a) $F_{N1} = -F$, $F_{N2} = 0$, $F_{N3} = -F$;

(b) $F_{N1} = 0$, $F_{N2} = F$, $F_{N3} = 0$;

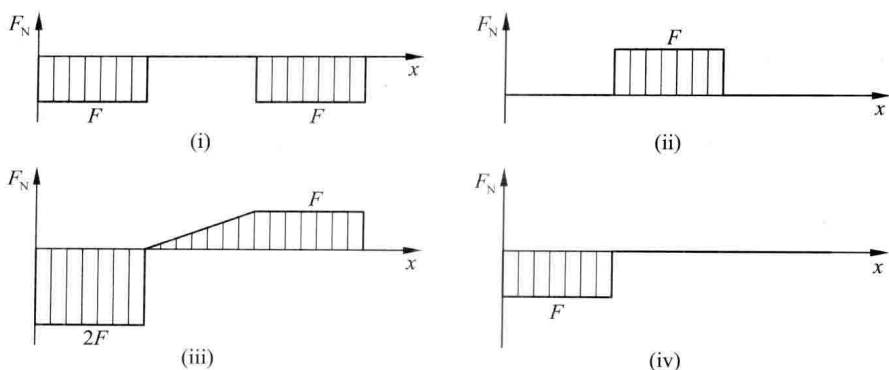
(c) $F_{N1} = -2F$, $F_{N2} = 0$, $F_{N3} = F$;

(d) $F_{N1} = -F$, $F_{N2} = 0$, $F_{N3} = 0$ 。

图(a), (b), (c), (d)所示各杆的轴力图分别如图(i), (ii), (iii), (iv)所示。

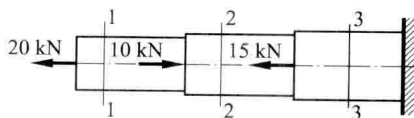


题1图



题1图 (续)

2. 图示杆的各段横截面面积分别为: $A_1 = 200 \text{ mm}^2$, $A_2 = 300 \text{ mm}^2$, $A_3 = 400 \text{ mm}^2$ 。试求杆 1-1, 2-2, 3-3 截面上的正应力。



题2图

解:

$$\sigma_1 = \frac{F_{N1}}{A_1} = \frac{20 \times 10^3 \text{ N}}{200 \text{ mm}^2} = 100 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = \frac{F_{N2}}{A_2} = \frac{10 \times 10^3 \text{ N}}{300 \text{ mm}^2} = 33.3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = \frac{F_{N3}}{A_3} = \frac{25 \times 10^3 \text{ N}}{400 \text{ mm}^2} = 62.5 \text{ MPa}$$

3. 图示一承受轴向拉力 $F = 10 \text{ kN}$ 的等直杆, 已知杆的横截面面积 $A = 100 \text{ mm}^2$ 。试求在 $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 的各斜截面上的正应力和切应力。



题3图

解: 横截面上的正应力为

$$\sigma = \frac{F_N}{A} = \frac{10 \times 10^3 \text{ N}}{100 \text{ mm}^2} = 100 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{0^\circ} = 100 \text{ MPa}, \quad \tau_{0^\circ} = 0;$$

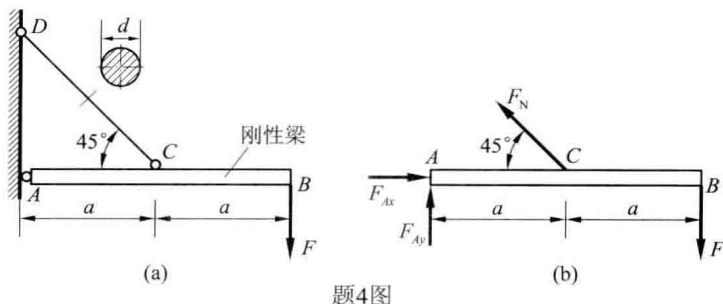
$$\sigma_{30^\circ} = \sigma \cos^2 30^\circ = 75 \text{ MPa}, \quad \tau_{30^\circ} = \frac{\sigma}{2} \sin 60^\circ = 43.3 \text{ MPa};$$

$$\sigma_{45^\circ} = \sigma \cos^2 45^\circ = 50 \text{ MPa}, \quad \tau_{45^\circ} = \frac{\sigma}{2} \sin 90^\circ = 50 \text{ MPa};$$

$$\sigma_{60^\circ} = \sigma \cos^2 60^\circ = 25 \text{ MPa}, \quad \tau_{60^\circ} = \frac{\sigma}{2} \sin 120^\circ = 43.3 \text{ MPa};$$

$$\sigma_{90^\circ} = \sigma \cos^2 90^\circ = 0, \quad \tau_{90^\circ} = \frac{\sigma}{2} \sin 180^\circ = 0$$

4. 图(a)所示结构中, CD 为圆截面杆, 材料的许用应力 $[\sigma] = 160 \text{ MPa}$, 铅垂载荷 $F = 20 \text{ kN}$, 试选择杆 CD 的直径 d 。



题4图

解: 刚性梁 AB 受力如图(b)所示, 由静力平衡方程

$$\sum M_A = 0, \quad F_N \cdot \frac{a}{\sqrt{2}} - F \cdot 2a = 0$$

$$F_N = 2\sqrt{2} F$$

由杆 CD 的强度条件

$$\sigma = \frac{F_N}{A} \leq [\sigma] \quad \text{即} \quad \frac{2\sqrt{2} \times 20 \times 10^3 \text{ N}}{\frac{\pi d^2}{4}} \leq 160 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

得杆 CD 的直径

$$d \geq 21.2 \text{ mm}$$

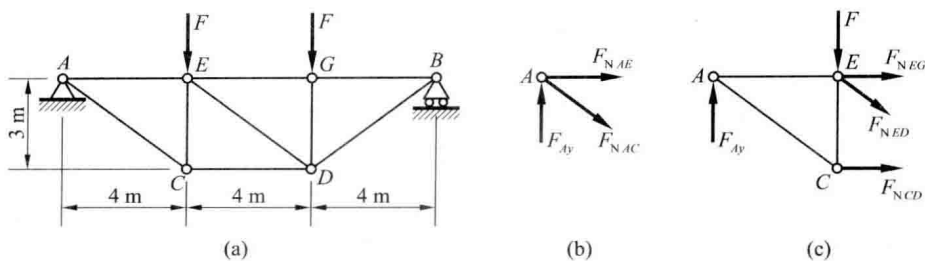
5. 图(a)所示桁架的各杆都是由两等边角钢所组成。已知 $F = 220 \text{ kN}$, 角钢的材料为三号钢, 其许用应力 $[\sigma] = 170 \text{ MPa}$ 。试为杆 AC 和 CD 选择所需角钢的型号。

解: 结点 A 受力如图(b)所示, 由平衡方程

$$\sum F_y = 0, \quad F_{NAC} \times \frac{3}{5} = F_{Ay}$$

$$F_{NAC} = 366.7 \text{ kN}$$

考虑图(c)所示部分的平衡, 由平衡方程



题5图

$$\sum M_A = 0, \quad F_{NCD} \times 3 = F_{Ay} \times 4$$

$$F_{NCD} = 293.3 \text{ kN}$$

由杆 AC 的强度条件

$$\frac{F_{NAC}}{2A_{AC}} \leq [\sigma] \quad \text{即} \quad \frac{366.7 \times 10^3 \text{ N}}{2A_{AC}} \leq 170 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

得杆 AC 中每根角钢的截面面积

$$A_{AC} \geq 1080 \text{ mm}^2 = 10.8 \text{ cm}^2$$

查表可选杆 AC 为 2 根 $80 \times 80 \times 7$ 的 8 号角钢。

由杆 CD 的强度条件

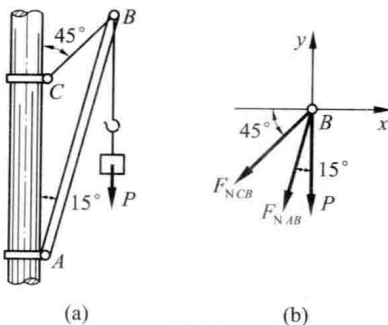
$$\frac{F_{NCD}}{2A_{CD}} \leq [\sigma] \quad \text{即} \quad \frac{293.3 \times 10^3 \text{ N}}{2A_{CD}} \leq 170 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

得杆 CD 中每根角钢的截面面积

$$A_{CD} \geq 863 \text{ mm}^2 = 8.63 \text{ cm}^2$$

查表可选杆 CD 为 2 根 $75 \times 75 \times 6$ 的 7.5 号角钢。

6. 一桅杆起重机如图(a)所示,起重杆 AB 为一钢管,其外径 $D = 20 \text{ mm}$,内径 $d = 18 \text{ mm}$;钢绳 CB 的横截面面积为 10 mm^2 。已知起重重量 $P = 2 \text{ kN}$,试计算起重杆和钢丝绳的应力。



题6图

解: 结点 B 受力如图(b)所示。由平衡方程

$$\sum F_x = 0, \quad F_{NCB} \cos 45^\circ + F_{NAB} \sin 15^\circ = 0$$

$$\sum F_y = 0, \quad F_{NCB} \sin 45^\circ + F_{NAB} \cos 15^\circ + P = 0$$

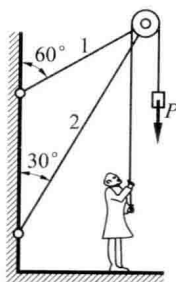
得

$$F_{NAB} = -2.828 \text{ kN}, \quad F_{NCB} = 1.035 \text{ kN}$$

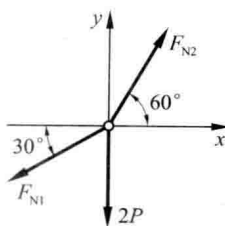
$$\sigma_{AB} = \frac{F_{NAB}}{A_{AB}} = \frac{-2.828 \times 10^3 \text{ N}}{\frac{\pi}{4} (20^2 - 18^2) \text{ mm}^2} = -47.4 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{CB} = \frac{F_{NCB}}{A_{CB}} = \frac{1.035 \times 10^3 \text{ N}}{10 \text{ mm}^2} = 104 \text{ MPa}$$

7. 图(a)所示起重架, 杆 1 为钢杆, 直径 $d_1 = 30 \text{ mm}$, 许用拉应力 $[\sigma_t] = 150 \text{ MPa}$; 杆 2 为铸铁杆, 直径 $d_2 = 40 \text{ mm}$, 许用压应力 $[\sigma_c] = 100 \text{ MPa}$, 试求起重架的最大起吊重量 P 。



(a)



(b)

题7图

解: 结点 B 受力如图(b)所示。由平衡方程

$$\sum F_x = 0, \quad F_{N2} \cos 60^\circ - F_{N1} \cos 30^\circ = 0$$

$$\sum F_y = 0, \quad F_{N2} \sin 60^\circ - F_{N1} \sin 30^\circ - 2P = 0$$

得

$$F_{N1} = 2P \text{ (拉)}, \quad F_{N2} = 2\sqrt{3}P \text{ (压)}$$

由杆 1 的强度条件

$$\frac{F_{N1}}{A_1} \leq [\sigma_t] \quad \text{即} \quad \frac{2P}{\frac{\pi}{4} \times 30^2 \text{ mm}^2} \leq 150 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

得

$$P \leq 53.0 \text{ kN}$$

由杆 2 的强度条件

$$\frac{F_{N2}}{A_2} \leq [\sigma_c] \quad \text{即} \quad \frac{2\sqrt{3}P}{\frac{\pi}{4} \times 40^2 \text{ mm}^2} \leq 100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

得

$$P \leq 36.3 \text{ kN}$$

起重架的最大起吊重量 $P_{\max} = 36.3 \text{ kN}$ 。

8. 用绳索吊运一重 $P = 20 \text{ kN}$ 的重物。设绳索的横截面面积 $A = 1\,260 \text{ mm}^2$ ，许用应力 $[\sigma] = 10 \text{ MPa}$ 。

(1) 当 $\alpha = 45^\circ$ 时，绳索强度是否够？

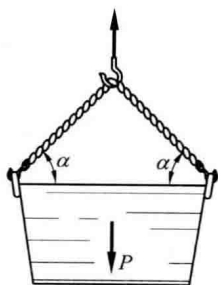
(2) 如改为 $\alpha = 60^\circ$ ，再校核绳索的强度。

解：绳索拉力

$$F_N = \frac{P}{2 \sin \alpha}$$

绳索中的应力

$$\sigma = \frac{F_N}{A} = \frac{P}{2A \sin \alpha}$$



题8图

(1) 当 $\alpha = 45^\circ$ 时，绳索中的应力

$$\sigma = \frac{F_N}{A} = \frac{P}{2A \sin \alpha} = \frac{20 \times 10^3 \text{ N}}{2 \times 1\,260 \times \sin 45^\circ \text{ mm}^2} = 11.2 \text{ MPa} > [\sigma]$$

绳索强度不够。

(2) 当 $\alpha = 60^\circ$ 时，绳索中的应力

$$\sigma = \frac{F_N}{A} = \frac{P}{2A \sin \alpha} = \frac{20 \times 10^3 \text{ N}}{2 \times 1\,260 \times \sin 60^\circ \text{ mm}^2} = 9.16 \text{ MPa} < [\sigma]$$

绳索强度满足要求。

9. 图示气缸，内径 $D = 560 \text{ mm}$ ，气缸内的气体压强 $p = 2.5 \text{ MPa}$ ，活塞杆直径 $d = 100 \text{ mm}$ ，所用材料的屈服极限 $\sigma_s = 300 \text{ MPa}$ 。

(1) 试求活塞杆的正应力和工作安全因数；

(2) 若连接气缸与气缸盖的螺栓直径 $d_1 = 30 \text{ mm}$ ，螺栓所用材料的许用应力 $[\sigma] = 60 \text{ MPa}$ ，试求所需的螺栓数。

解：(1) 活塞杆的轴力

$$F_N = p \cdot \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = 596.1 \text{ kN}$$