

骨骼机械性能



GUGE
JIXIE
XINGNENG

GUGE
JIXIE
XINGNENG

内 容 简 介

《骨骼机械性能》一书首先介绍了力学的基础知识和材料机械性能指标的基本概念；其次介绍了骨骼的结构和某些运动学、动力学的分析结果。在此基础上系统地介绍了长骨，尤其是密质骨的机械性能和对它的影响因素。最后概要地介绍了其它骨的机械性能。书中收集了许多国外科研成果及近些年来国内的研究资料。书后附有骨的机械性能学术术语中、英、俄文对照。

本书可供从事生物力学和与生命科学有关学科（包括医疗、卫生保健、体育、生物，以及劳动保护、假肢与医疗器械生产等）的科技人员和大专院校师生的参考。

前 言

骨骼机械性能是生物力学的一个组成部分。生物力学是处于生命科学（包括生物学、生理学、医学、体育运动、卫生保健、劳动保护等）与力学之间的一门学科。它将生命、运动和运动的原因——力统一起来进行研究。为解决生命科学的许多问题提供了力学的基本理论和分析方法。骨的机械性能就是用力学的基本理论和方法研究骨，给出骨在承受各种机械载荷时的性能及其变化规律。骨的机械性能是进行骨科疾病诊断、确定医疗方案的基础，也是进行合理的体育锻炼、科学的卫生保健、有效的安全防护，以及进行假肢生产等的参考性数据。

骨的机械性能研究工作已有百余年的历史，积累了不少资料。近些年，我国也有不少研究成果。尽管有的资料很零散，有的数据很分散，有的测试手段不够先进，有的数例不够多，甚至有的研究者之间数据不甚吻合，结论不甚一致，但仍不失汇总它们的价值。本书取材于国内外有关书刊及近些年国内有关会议资料，书中力图将前人的研究成果进行归纳、总结，以利于今后研究工作的开展，也作为我们承担的国家自然科学基金资助课题《骨骼机械性能与人机工程》研究工作的一个组成部分。

全书共分四章，第一章为力学的基础知识和材料机械性能指标的基本概念。第二章为骨骼的结构和某些运动学、动力学的分析结果。第三章为长骨的机械性能，重点介绍了密

质骨的机械性能和各种影响因素，最后也概要的介绍了松质骨的机械性能。第四章为其它骨的机械性能，包括颅骨、牙、短管状骨、脊椎骨与椎间盘、软骨等。为了便于生物力学工作者和生命科学诸学科专业人员阅读资料，本书给出了骨骼机械性能学术术语中、英、俄文对照。

本书由吉林工业大学陈浚华编著。董心等参加了部分资料翻译与整理工作。书中的附图由黎苏、张旭描绘。

吉林工业大学张理苏教授、施德广副教授对本书提出了不少宝贵意见。材料力学教研室、固体生物力学课题组、力学实验室的同志们给予了许多支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，资料不足，书中的缺点、错误在所难免，诚恳的欢迎读者批评指正。

目 录

第一章 工程构件的变形及工程材料机械性能指标的	
基本概念	(1)
一、工程构件变形的基本形式和应力、变形的基本规律	(1)
二、材料静载机械性能	(13)
三、材料变形的时间效应	(24)
四、材料的各向异性性能	(29)
五、材料的动荷强度	(32)
第二章 骨骼的结构	(36)
一、人体解剖方位	(36)
二、骨骼概论	(38)
三、全身诸骨	(43)
四、骨骼肌概述	(54)
五、几个主要关节及其某些生物力学问题简介	(57)
第三章 长骨的机械性能	(71)
一、密质骨静载机械性能	(71)
二、湿度对密质骨机械性能的影响	(80)
三、温度对密质骨机械性能的影响	(89)
四、密质骨机械性能的方向性差异	(95)
五、密质骨机械性能的形位差异	(110)
六、载荷作用性质对密质骨机械性能的影响、骨的粘弹性性能	(126)
七、年龄、性别、种族、种类不同时,密质骨机械性能的差异	(140)
八、影响长骨密质骨机械性能的其他因素	(157)

九、松质骨的机械性能	(162)
第四章 其它骨的机械性能	(170)
一、颅骨	(170)
二、牙、短管状骨和肋骨	(182)
三、脊椎骨与椎间盘	(189)
四、软骨和胶原组织	(199)
结语	(207)
附录	(209)
参考资料	(220)

第一章 工程构件的变形及工程材料 机械性能指标的基本概念

一、工程构件变形的形式和应力、变形的规律

工程结构的每一组成部分称为工程构件，最常见的是杆件。它们都由固体材料制成，在工作时都受到一定载荷的作用而发生变形。工程中一般都将可变形固体抽象成均匀连续的、各个方向机械性能完全相同的各向同性体，且产生的变形是微小的。

工程构件的变形有弹性变形和塑性变形。随外力解除而消失的变形称为弹性变形，外力解除后不能消失的变形称为塑性变形或残余变形。

构件在载荷作用下各点处产生应力。截面上通常有两种应力：与截面垂直的称正应力，以 σ 表示；与截面平行的称剪应力，以 τ 表示。应力的单位为力/长度²，在工程单位制中以 kgf/cm^2 或 kgf/mm^2 表示；在国际单位制中以 N/m^2 表示，称为Pa，也常使用 $\text{MPa}(10^6\text{N/m}^2)$ 或 $\text{GPa}(10^9\text{N/m}^2)$ 。其间有换算关系 $1\text{MPa}=10\text{kgf/cm}^2$ 。（ kgf/cm^2 为非许用单位）。

构件在外力作用下各点处的变形程度用应变表示。应变有两种：线应变 ϵ 表示构件沿某方向长度改变的程度，等于长

度变化量除以原长；剪应变 γ 表示构件内原来相互垂直的两根棱边之间直角的改变量。线应变和剪应变均为无量纲的量。

由于作用在构件上的外力有各种情况，故构件的变形也有各种形式。归纳起来，有四种基本变形或由某几种基本变形组合而成的组合变形。每一种基本变形时的应力分布和变形规律为：

1. 轴向拉伸或压缩

杆件受到一对大小相等、方向相反、作用线与杆轴线重合的外力作用时，杆的轴向将伸长(或缩短)。见图 1-1-1(a)。

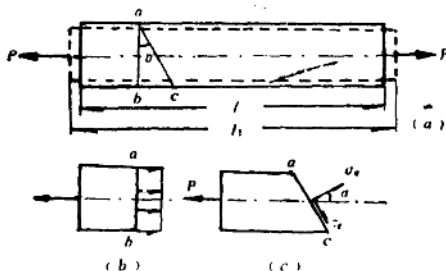


图1-1-1 轴向拉伸和压缩

(a) 外力作用与变形 (b) 横截面上的应力 (c) 斜截面上的应力

杆的横截面上有均匀分布的正应力(受拉时为拉应力，受压时为压应力)，即

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

其中 N 为拉、压时的内力——轴力， A 为横截面面积。应力分布见上图(b)。

实践表明，在构件尺寸突然改变处的横截面上，应力在该区域附近将急剧增加。这种因构件外形突然变化而引起的

应力局部增大的现象称为应力集中。

构件在与横截面成 α 角的斜截面上有正应力 σ_α 和剪应力 τ_α ，即

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

见上图(c)。当 $\alpha = \pm 45^\circ$ 时， τ_α 达最大值。

在弹性范围内，承受轴向拉、压的杆，纵向伸长量 $\Delta l = l_2 - l$ 与轴力、杆长成正比，与面积成反比。纵向线应变与正应力成正比，有关系：

$$\Delta l = \frac{Nl}{EA} \quad \sigma = E\varepsilon$$

称为拉压时的虎克定律，其中 E 为拉压弹性模量。各种材料的 E 值不等， E 越大，材料越不易变形。杆的横向线应变 ε' 与纵向线应变 ε 之比的绝对值为一常数，但二者的方向相反，即

$$\left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right| = \mu$$

μ 称为材料的泊松比。各种材料 μ 值不等， μ 越大表明材料横向变形越大。

2. 剪 切

杆件受到一对大小相等、方向相反，作用线垂直于杆轴且距离很近的一对外力作用。杆沿外力作用方向发生相对的错动，见图1-1-2。工程上假设以承受剪切变形为主的构件（主要是连接件）横截面上有均匀分布的剪应

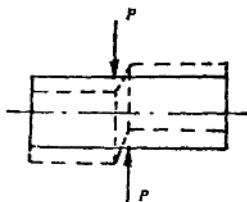


图1-1-2 剪切

力。在弹性范围内，剪应力与剪应变成正比，即

$$\tau = G\gamma$$

称为剪切虎克定律，其中 G 为材料剪切时的弹性模量。

3. 扭 转

杆件受到一对大小相等、方向相反、作用面都垂直于杆轴的两个力偶矩作用。杆的任意两个横截面将发生绕轴线的相对错动，见图1-1-3(a)。

承受扭转变形的圆形杆件，在弹性范围内，横截面上有沿半径线性分布的剪应力，即

$$\tau_{\rho} = \frac{M_n \cdot \rho}{I_p}$$

用此式求出的是距圆心为 ρ 远的任意点处的剪应力，其中 M_n 为扭转时横截面上的内力-扭矩。最大剪应力发生在边缘上各点，有

$$\tau_{\max} = \frac{M_n}{W_n}$$

$$\text{且 } W_n = \frac{I_p}{\rho_{\max}}$$

见上图(b)。两式中 I_p 和 W_n 为只与截面形状和尺寸有关的几何量，分别称为极惯性矩和抗扭截面模量。

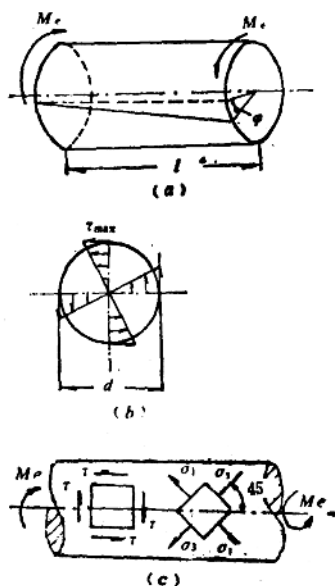


图1-1-3 扭转

- (a) 两截面间的相对转角
- (b) 圆杆横截面上的剪应力分布
- (c) 表面一点应力状态

圆杆相距为 l 的两个横截面间产生相对扭转角，有

$$\varphi = \frac{M_n \cdot l}{G \cdot I_p}$$

对于圆环形截面，当截面中线为封闭曲线和不封闭曲线时的剪应力分布见图1-1-4(a)、(b)。闭口截面剪应力沿壁厚均匀分布，开口截面为线性分布。在相同扭矩作用下，开口截面杆应力和扭转角都比闭口截面大得多。

4. 弯 曲

杆受到垂直于杆轴的横向力作用，或受到作用于杆纵向平面内的一对大小相等、方向相反的力偶作用，杆的轴线由直线变成曲线，见图1-1-5(a)。

承受平面弯曲变形的构件，一般来说，横截面上有两种内力：弯矩 M 和剪力 Q 。对应着有两种应力：线性分布的正应力 σ 和二次曲线分布的剪应力 τ ，见上图(c)。其中正应力是主要的。在弹性范围内，横截面任一点处的正应力为：

$$\sigma = \frac{My}{I}$$

式中 y 为该点到中性轴的距离， I 为只与截面形状和尺寸有关的几何量，称为对中性轴的惯性矩，其中性轴 z 通过截面形心，见上图(b)。最大正应力发生在弯矩最大截面的上、下边缘点，且一侧受拉、另一侧受压。若截面对中性轴上下对称，则最大拉、压应力相等，否则不相等。

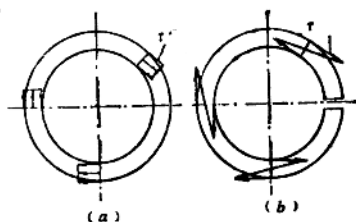


图 1-1-4 圆环形截面扭转剪应力分布

(a) 闭口 (b) 开口

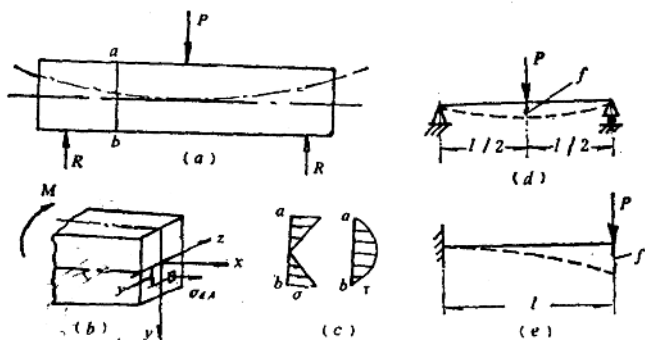


图1-1-5 弯曲

(a) 杆的受力和变形 (b) 中性轴位置 (c) 横截面上应力分布 (d) 简支梁的变形 (e) 悬臂梁的变形

受平面弯曲构件在载荷作用下，轴线由直线变成平面曲线，任一截面形心的垂直位移 f 称为该点的挠度，任一截面对其原来位置所转过的角度 θ 称为该截面的转角。

四种基本变形时横截面上的应力分布和杆的变形规律汇总于表1-1-1中。几种常见截面的几何性质见表1-1-2。

5. 组合变形

当构件同时承受几种基本变形时，就称为组合变形。此时可把载荷简化成几个静力等效的载荷，使它们各自对应着一种基本变形。在一定范围内，每一种基本变形都是各自独立、互不影响的，故可分别计算每一种基本变形下的应力和变形，然后求出它们的总和，便是杆在原载荷作用下的应力和变形。

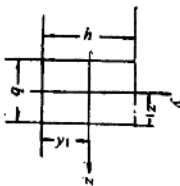
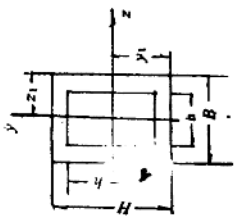
在组合变形下杆中任一点的应力状态都可用从该点取出的单元体上的六个应力分量表示，即， $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz},$

表1-1-1 四种基本变形时横截面上的应力分布和杆的变形规律

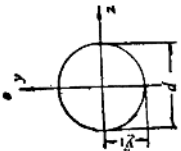
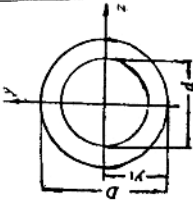
变形形式	内力	横截面上的应力	几何量	杆的变形	变形计算式
轴向拉伸与压缩	轴力 N	正应力 $\sigma = \frac{N}{A}$ 均匀分布	面积 A	纵向伸长或缩短 横向收缩或胀大 (l 为杆长)	轴向 $\Delta l = \frac{Nl}{EA}$ $e = \frac{\Delta l}{l}$ 横向 $e' = -\mu e$
剪切	剪力 Q	剪应力 $\tau = \frac{Q}{A}$	面积 A	杆沿外力方向发生相对错动	
圆轴扭转	扭矩 M_n	距圆心为 ρ 处的剪应力 $\tau_\rho = \frac{M_n \cdot \rho}{I_p}$ 沿半径线性分布, 圆截面边缘处应力最大, $\tau_{m \cdot x} = \frac{M_n}{W_n}$	极惯性矩 I_p 抗扭截面模量 W_n $W_n = \frac{I_p}{\rho_{m \cdot x}}$	相距为 l 的任意两个截面发生绕轴线的相对错动, 产生扭转角 φ	$\varphi = \frac{M_n \cdot l}{GI_p}$
平面弯曲	弯矩 M 剪力 Q	距中性轴为 y 处的正应力 $\sigma = \frac{M \cdot y}{I}$ 沿截面高度线性分布, 上、下边缘处应力最大, $\sigma_{m \cdot x} = \frac{M}{W}$ 一侧受拉, 一侧受压另外还有剪应力	对中性轴的惯性矩 I , 抗弯截面模量 W $W = \frac{I}{y_{m \cdot x}}$	杆轴线由直线变成曲线, 截面形心产生挠度 f , 截面产生转角 θ	两端铰支简支梁中点受集中力 P 作用, 中点挠度 $f = \frac{Pl^3}{48EI}$ 一端固定, 一端自由悬臂梁端点受集中力 P 作用, 端点挠度 $f = \frac{Pl^3}{3EI}$ 其中 l 为梁长, 其它结构查有关手册

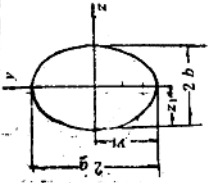
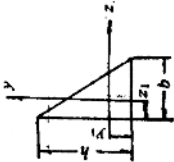
表1-1-2

几种常见截面的几何性质

截 面	面 积	形心位置	惯性矩 I 和极惯性矩 I_p	抗弯截面模量 W 和抗扭截面模量 W_t
	$A = bh$	$y_1 = \frac{h}{2}$ $z_1 = \frac{b}{2}$	$I_s = \frac{bh^3}{12}$ $I_p = \frac{hb^3}{12}$	$W_s = \frac{bh^2}{6}$ $W_p = \frac{hb^2}{6}$
	$A = BH - bh$	$y_1 = \frac{H}{2}$ $z_1 = \frac{B}{2}$	$I_s = \frac{BH^3 - bh^3}{12}$ $I_p = \frac{HB^3 - hb^3}{12}$	$W_s = \frac{BH^3 - bh^3}{6H}$ $W_p = \frac{HB^3 - hb^3}{6B}$

续表 1-1-2

截 面	面 积	形心位置	惯性矩 I 和极惯性矩 I_p	抗弯截面模量 W 和抗扭截面模量 W_n
	$A = \frac{\pi d^2}{4}$	$y_1 = \frac{d}{2}$	$I_y = I_z = \frac{\pi d^4}{64}$ $I_p = \frac{\pi d^4}{32}$	$W_y = W_z = \frac{\pi d^3}{32}$ $W_n = \frac{\pi d^3}{16}$
	$A = \frac{\pi D^2}{4} (1 - \alpha^2)$ $\alpha = \frac{d}{D}$	$y_1 = \frac{D}{2}$	$I_y = I_z = \frac{\pi D^4}{64} (1 - \alpha^4)$ $I_p = \frac{\pi D^4}{32} (1 - \alpha^4)$	$W_y = W_z = \frac{\pi D^3}{32} (1 - \alpha^4)$ $W_n = \frac{\pi D^3}{16} (1 - \alpha^4)$

截 面	面 积	形心位置	惯性矩 I 和极惯性矩 I_P	抗弯截面模量 W 和抗扭截面模量 W_t
	$A = \pi ab$ $\frac{a}{b} > 1$	$y_1 = a$ $z_1 = b$	$I_x = \frac{\pi b^3 b}{4}$ $I_y = \frac{\pi a b^3}{4}$	$W_x = \frac{\pi a^2 b}{4}$ $W_y = \frac{\pi a b^2}{4}$
	$A = \frac{bh}{2}$	$z_1 = \frac{b}{3}$ $y_1 = \frac{h}{3}$	$I_x = \frac{bh^3}{36}$ $I_y = \frac{hb^3}{36}$	$W_{x下} = \frac{bh^2}{12}$ $W_{x上} = \frac{bh^2}{24}$ $W_{y左} = \frac{b^2 h}{12}$ $W_{y右} = \frac{b^2 h}{24}$

τ_{xx} , 见图1-1-6。其中三个正应力的脚标既表示应力作用面

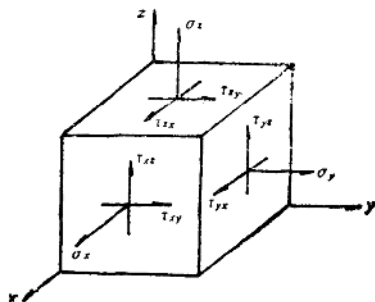


图1-1-6 一点的应力分量

的法线方向, 又表示应力作用的方向。三个剪应力中第一个脚标表示作用平面的法线方向, 第二个脚标表示应力作用的方向, 且两个相互垂直面上的剪应力数值相等, 方向均垂直于两面交线, 见图1-1-3(c)。

同样, 任一点的应变状态也可用六个应变分量表示, 即 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$, 其中前三个是三个方向的线应变, 后三个是剪应变, 表示三个平面内原来直角的改变量。

一点处可找到三个主应力, 即为剪应力为零面上的正应力, 且有 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 。一点处的主应力分别有三种可能: 只有一个不等于零、有两个不等于零、三个主应力全不等于零, 分别称此三种情况为单向、二向、三向应力状态。轴向拉(压)时有 $\sigma_1 > 0$ (或 $\sigma_3 < 0$), 为单向应力状态, 扭转时有 $\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau$, 为二向应力状态。

在单向应力状态下, 在弹性范围内, 一个方向上作用的正应力不仅引起该方向上的线应变, 且还引起另外两个方向的线应变, 即