



赵芳等编著

4.6

人体材料力学

北京体育大学出版社

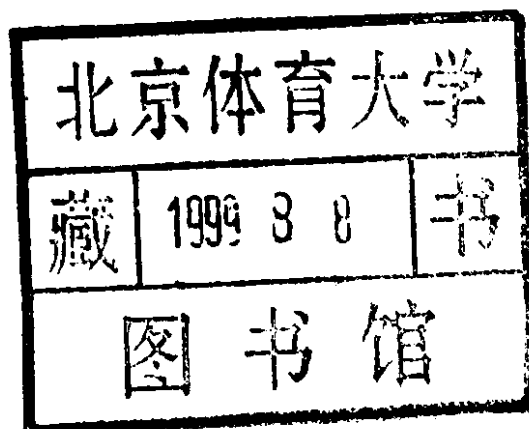
67804.6
59

398322

人 体 材 料 力 学

赵 芳 周兴龙 编著

Ty21/21



北京体育大学出版社



北体大 B00097397

责任编辑:董英双

审稿编辑:鲁 牧

责任校对:刘 祺

绘 图:赵 芳 叶 莱

责任印制:长 立 陈 莎

图书在版编目(CIP)数据

人体材料力学/赵芳,周兴龙编著. - 北京:北京体育大学出版社,1998.11

ISBN 7-81051-324-9

I.人… II.①赵…②周… III.人体结构-材料力学 IV. G804.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 21344 号

人体材料力学

赵 芳 周兴龙 编著

北京体育大学出版社出版发行
(北京西郊圆明园东路 邮编:100084)

新华书店总店北京发行所经销
北京雅艺彩艺有限公司印刷

开本:850×1168 毫米 1/32

印张:7.375

定价:7.20 元

1998 年 11 月第 1 版

1998 年 11 月第 1 次印刷

印数:2100 册

ISBN 7-81051-324-9/G·288

(本书因装订质量不合格本社发行部负责调换)

前 言

人体机械运动是通过大脑思维、肌肉收缩、骨骼的复杂运动而形成的。了解骨骼、肌肉和肌腱在各种受载状态下的功能与规律,揭示人体材料的力学性质,可为教练员和运动员提供科学训练的依据,为损伤机理的进一步研究提供依据。

人体材料力学主要研究人体骨、肌肉、韧带的力学性质,获得应力-应变本构方程,测定它们在生理状态或模拟生理状态下的粘弹性性质等。

这是一门年轻的正在迅速发展的学科。近些年来,不少国内外学者在这一领域进行了诸多的试验研究,得到了人体骨在各种载荷下的强度和刚度以及密质骨和松质骨的力学特性。研究骨和肌肉、肌腱的粘弹性性质,并分别获得了它们的本构方程。在实验手段和研究方法方面也取得了很大进展。此研究成果在体育界、医学界等取得了一定的效益,但是就它的理论体系来说,目前尚不完善。

我校于 1990 年将《人体材料力学》列为运动生物力学专业生的必修课程。应教学的需要,我们于 1992 年编写了《人体材料力学》讲义。经过在教学实践中试用和修改,我们在讲义的基础上修订完成了本教材。

活体的骨、肌肉和肌腱都是一些力学性质十分复杂的材料。

人体材料力学涉及到人体解剖学、生理学、材料力学及粘弹性力学等多学科的知识。以什么样的理论体系将它们融合起来,怎样去设计教材的内容,如何将力学和生物学的不同描述风格统一起来,也就是说,如何将前人的研究成果进行归纳、总结,使之成为适应教练员、运动员和体育科学工作者需要的有系统理论的教材,这是我们在编写教材时始终注意到的一个问题。

我们将教材分为两个部分:一部分是材料力学基础和粘弹性力学基础,另一部分是骨和肌肉的力学性质。在第一部分中,围绕变形固体的强度和刚度、粘弹性体的特性,讲述材料力学、粘弹性力学中的基本概念,如应力、应变、本构方程的概念,构件的受载形式,粘弹性体的力学模型等。第二部分讨论骨的力学性质,骨的功能适应性,骨折的生物力学以及肌肉的力学性质等。在第二部分中,我们广泛搜集并采纳了许多经典著作和文献中的内容,经归纳整理编入教材之中。

由于时间所限,加之资料不足,教材中不免存在不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

1998年5月于北京体育大学

目 录

第一章 导 论	(1)
一、人体材料力学的任务及研究方法	(1)
二、变形固体及其基本假设	(3)
第二章 材料力学基础	(6)
一、内力及截面法	(6)
二、应 力	(8)
三、变形及应变	(12)
四、杆件的基本变形	(18)
五、杆件的拉伸与压缩	(21)
六、弹塑性材料的力学性质	(29)
七、剪 切	(35)
八、扭 转	(38)
九、弯 曲	(56)
十、平面应力状态的应力分析和应力圆	(76)
十一、平面应力状态的最大应力及主应力概念	(82)
十二、三向应力状态的最大应力	(85)
第三章 粘弹性力学基础	(88)
一、粘弹性材料的特征	(89)

二、粘弹性体的力学模型·····	(91)
三、粘弹性模型的复数模量·····	(104)
四、粘弹性模型对于生物力学的意义·····	(107)
五、粘弹性体的准线性理论·····	(108)
第四章 骨的力学性质和功能适应性·····	(112)
一、骨的结构与机能·····	(112)
二、骨密质的力学性质·····	(121)
三、骨松质的力学性质·····	(131)
四、骨的功能适应性·····	(139)
五、骨的粘弹性性质·····	(154)
六、骨折的生物力学·····	(166)
第五章 肌肉和肌腱、韧带的力学性质·····	(184)
一、生物粘弹性体的性质·····	(184)
二、肌肉的形态与构造·····	(197)
三、肌肉的工作性质和协作关系·····	(203)
四、肌肉的收缩机理·····	(210)
五、肌肉收缩时的波动叠加及肌肉收缩的形式·····	(211)
六、Hill 方程和 Hill 的三元素模型·····	(218)

第一章 导 论



一、人体材料力学的任务及研究方法

生物力学是将力学应用于生物学,用力学原理研究生物体生命活动规律的一门学科,是由力学、解剖学、生理学和生物化学等学科相互渗透而产生的一门边缘学科。作为一门独立的学科,它是在本世纪 60 年代以后才迅速发展起来的。近年来,生物力学对人体运动分析、疾病原因研究、各种假体和人工脏器的设计乃至对体育科学、人类学、宇航学等的发展都发挥了极其重要的作用。

生物力学是一门研究领域广泛,内容非常丰富的学科。从研究细胞、组织、生物纤维的构造与力学性态的关系的微观生物力学,到研究各种动、植物和人以及整个生物系统和外界环境的相互作用等,都属于生物力学的研究范畴。生物量子力学、生物热力学等是生物力学中具有高度理论性的分支;创伤力学、医用生物力学、运动生物力学等则是一些实用性很强的分支。

作为生物力学的一个方面,人体材料力学主要研究人体固体材料的力学性质。人体固体材料包括骨、肌肉、肌腱、韧带、皮肤、血管等。它们不是理想的弹、塑性材料或粘弹性体,有着各自的力学特性。骨的力学性质相似于机械和建筑材料,比较易于了解,现

在对骨的认识也比较完全和准确。而人体中的肌肉、肌腱、韧带、皮肤、血管等软组织具有一定的粘弹性性质,而且软组织种类多,情况复杂,各自的力学性质不同,因此研究时必须注意材料试验结果,将试验情况与理论分析结合起来。

遵循力学的一般研究方法,对人体材料力学性质的研究有下述步骤:

(1)研究人体材料的结构。解剖学可以使我们了解研究对象的几何构造。

(2)测定骨、肌肉和肌腱等材料的力学性质,建立材料的本构方程。这是研究人体材料力学性质的中心问题之一。在生物力学研究中,因为不能将骨、肌肉和肌腱等材料剥离进行试验,特别是不能维持其活体状态,这一步往往非常困难。再有,生物材料往往产生大变形,同时应力—应变关系一般是非线性的,并有赖于历程,很难确立非线性的本构方程。解决的方法是,先建立材料本构方程的数学形式,再通过实验进行验证,修改数学公式,确定数学参量。

(3)根据本构方程和物理学中的基本定律建立描述材料性质的微分方程。

(4)用解析法或数值法求解所建立的具有一定边界条件的微分方程。

(5)进行生理实验,对上述边界值问题的解进行验证,修改理论推导结果,使理论与实验相一致。通过一系列反复的研究,从定性和定量两方面对问题进行了解,以期通过材料力学性质的变化来推测器官机能的变化。

目前许多问题还不能按上述步骤得到满意的解决,主要原因是难以满足建立活体组织本构方程所需的实验条件。如果将人体组织与器官从其所处环境中分离出来,则不能获得描述活体组织力学性质的微分方程的边界条件,从而不能获得边界值问题的解。

这是目前生物力学领域里有待解决的一个问题。

人体材料力学是体育科学理论体系中的一门基础理论课程。本教材的内容分为两大部分:第一部分简要介绍材料力学及粘弹性力学中的一些基本概念;第二部分分别讨论骨、肌肉、肌腱和韧带的力学性质。

二、变形固体及其基本假设

在理论力学中,主要以质点、刚体等为研究对象。所谓刚体,就是在外力作用下大小和形状都不发生改变的物体,是一种抽象的力学模型。实际上,任何物体在外力作用下都会发生变形或是损坏。材料力学研究的是材料的强度、刚度问题,而物体的变形是影响材料强度、刚度的重要因素,所以在材料力学中,假设一切固体都是变形固体。

材料在外力作用下将发生变形,多数材料具有抵抗外力作用的能力,即去除外力后,能够恢复其原有的形状和大小,材料的这种性质称为弹性。若去除外力后,材料的变形不能恢复,材料的这种性质称为塑性。若去除外力后,材料能够完全恢复原状,这种物体就称为完全弹性体,不能完全恢复原状的物体就称为部分弹性体。

部分弹性体的变形有两部分:一部分是随着外力去除而消失的变形,称为弹性变形;另一部分是去除外力后不能消失的变形,称为塑性变形。自然界中没有完全的弹性体,一般的变形固体既具有弹性也具有塑性。

在一般的材料力学中,把材料的弹性阶段作为研究的主要范围。由于人体材料具有非线性弹性体和粘弹性体的性质,因此本教材中除介绍一般材料力学和线弹性体力学的研究方法之外,还将介绍粘弹性理论。

(一)基本假设

为了突出材料的主要性质以及简化计算,在一般材料力学及线弹性力学中,常用到下面的基本假设:

1. 材料的连续性假设

即认为构成物体的物质毫无空隙地充满了物体的几何容积。因而物体内的一些物理量,如应力、应变、位移等,可看成是连续的,也就可以用连续函数来表示它们的变化规律。

2. 材料的均匀性假设

即认为材料在各处都具有相同的力学性质。根据这个假设,就可以取出物体内的任意一小部分加以分析研究,然后把分析的结果推广到整个物体。同时,也可以将那些由较大尺寸的试件通过实验而获得的结果,应用到物体上的任何微小部分。

3. 材料的各向同性假设

即认为材料在各个方向都具有相同的力学性质。在研究了材料在任一方向的性质后,就可以将结论用于其他任何方向,亦即不必考虑材料的方向性问题。

4. 材料的小变形假设

即认为材料的变形与整个物体的原始尺寸比较起来是极其微小的。根据这个假设,我们在建立静力学平衡方程或分析其它问题时,就可以不考虑外力作用点在物体变形后发生的微小的位置改变,而仍按其变形前的尺寸进行计算。

对于很多工程材料,用以上假设所引起的误差非常小。但对于人体材料,不能应用以上这些假设。例如,人体材料中的骨骼和肌肉就不是均匀、各向同性的。另外,除长骨受力时符合小变形假设外,其它组织在正常情况下的变形均为大变形。因此,应用非线性弹性理论和粘弹性理论的基本假设更为恰当。

(二)强度和刚度的概念

强度和刚度是人体固体材料的重要力学性质。在一般材料力学中,用强度和刚度这两个概念来衡量构件的承载能力。

1. 强 度

强度是指材料抵抗破坏的能力。构件承受载荷时,要求它具有足够的抵抗破坏的能力,不发生破坏,即具有足够的强度。例如,要求起重机的吊环具有足够的强度,是指它在起吊重物时不发生断裂。人体材料的强度也具有相同的意义。

2. 刚 度

刚度是指材料抵抗变形的能力。在某些情况下,构件虽不发生断裂,但是由于变形过大,也会使机器部件不能正常工作。保证构件具有足够的抵抗变形的能力,即具有足够的刚度。对于细长直杆,要求它们在工作中始终保持原有的直线平衡状态,即构件具有足够的稳定性。压杆稳定性问题的研究对于研究人体杆状构件很有意义。

第二章 材料力学基础



一、内力及截面法

系统内各物体之间的相互作用力称为内力。分析人体受力时,通常以人体各环节为研究对象,而不以人体整体为研究对象。这是因为人作为整体虽不受外力作用,但人的各环节之间有相互作用的内力,正是人体各部分之间的内力使人的各环节发生了位置改变。

为了求出在外力作用下的物体内部某一截面上的内力,可采用“截面法”。如(图 1-1a)所示,物体在外力作用下处于平衡状态。用一假想的平面把这物体截开,物体分成两部分 A 和 B(图 1-1b,c),它们分别处于平衡状态,取 A 为研究对象(图 1-1b),A 部分受到外力 P_1 和 P_2 的作用,由于 A 部分处于平衡状态,则 B 部分必然有力地作用在 A 部分的被截开的平面上。A 部分与 B 部分之间的相互作用力就是截面上的内力。

根据 A 部分的平衡条件可以求出内力的大小,这种用一假想的截面将物体截开,对截开后的两部分之一建立平衡方程而求出内力的方法叫做截面法。它可归纳为以下三个步骤:

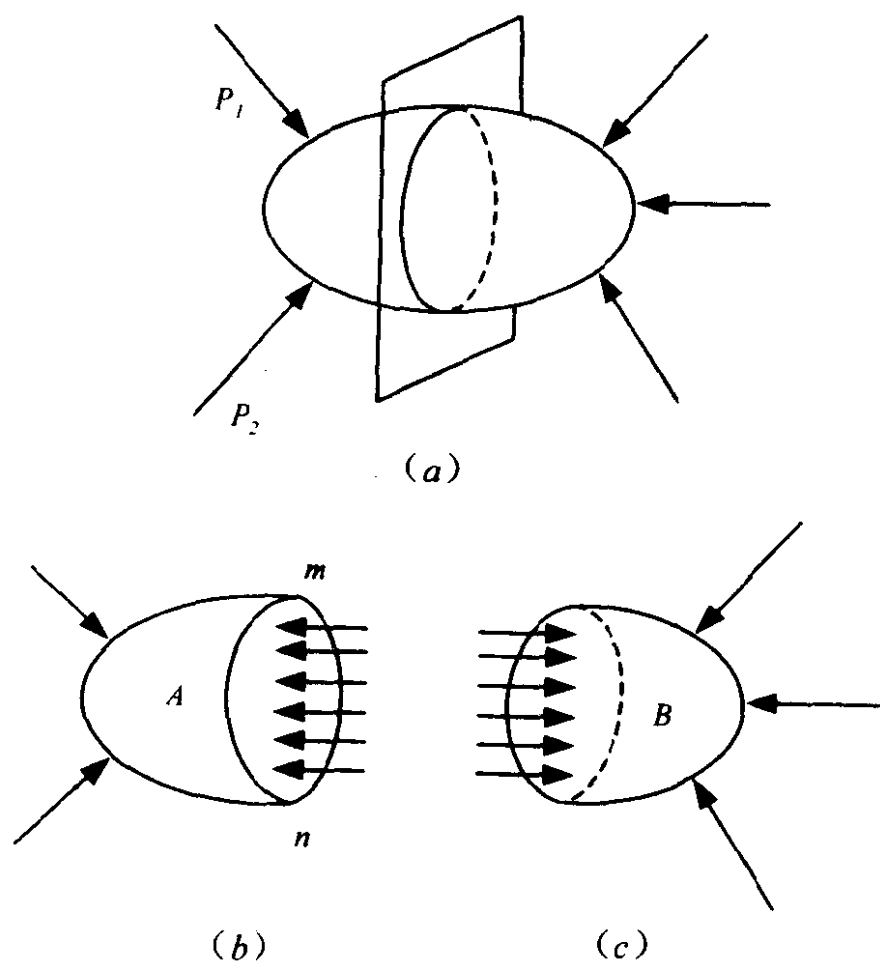


图1-1

①欲求某一截面上的内力,就沿该截面假想地把物体分成两部分,任意地留下一部分作为研究对象,并弃去另一部分。

②被弃去部分对留下部分的作用力用欲求的内力代替。

③建立被留下部分的平衡方程,求出内力。

需要强调的是:在理论力学中,可以把作用在刚体上的某些力用等效力系来代替,比如研究刚体的受力情况时,可以用等效力系来替代原力系,但在材料力学中,等效力系的应用受到了限制。研

究物体的变形求内力时,在应用截面法之前,不容许把力沿着作用线移动,不容许把力偶在其作用面内移动,也不容许用合力或分力代替某些力。总之,不能用外力的等效力系来替代外力本身的作用。因为这样做虽然不影响对物体运动状态的研究,却改变了物体全部或某些部分的内力及变形。

二、应 力

在研究物体的承载能力时,我们不但要知道物体在力的作用下沿着哪一截面发生破坏,而且还要知道在截面上哪点最先发生破坏。此时,仅知道截面上内力的总和是不够的,还需知道截面上内力分布的情况,也就是各处内力的集度。根据材料的连续性假设和均匀性假设,物体的内力可认为是连续分布地作用在截面上。

(图 1-2)画出了沿截面 $m-n$ 截取物体的一部分。在截面上一点 M 周围划取一块微面积 ΔS ,设作用在 ΔS 上的内力为 ΔP ,

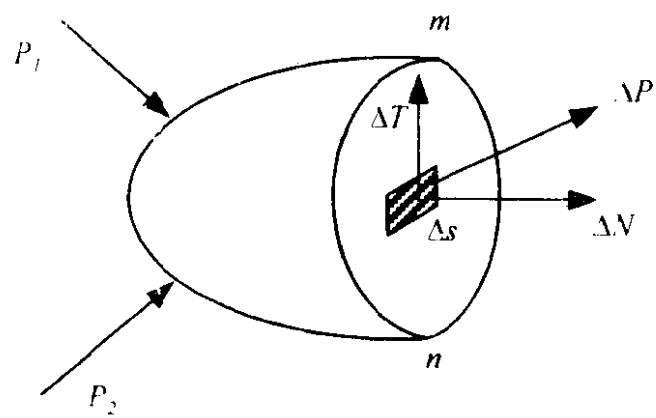


图1-2

$$P_m = \frac{\Delta P}{\Delta S} \quad (1-1)$$

P_m 是面积 ΔS 上的平均内力集度,称为 ΔS 上的平均应力。

将内力 ΔP 分解为垂直于截面的法向分力 ΔN 及沿截面的切

向分力 ΔT (图 1-2), 则有:

$$\sigma_m = \frac{\Delta N}{\Delta S} \quad (1-2)$$

及

$$\tau_m = \frac{\Delta T}{\Delta S} \quad (1-3)$$

上式中 σ_m 称为微面积 ΔS 上的平均正应力, τ_m 称为这个微面积上的平均剪应力。

截面上的内力分布一般来说是不均匀的, 用平均应力不能说明 M 点的实际应力情况, 因为 M 点的平均应力大小与微面积 ΔS 的大小有关。利用极限的概念, 让 ΔS 趋于无限小, 就能求得 M 点处的应力。在 ΔS 趋于无限小的极限情况下:

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta S} = \frac{dN}{dS} \quad (1-4)$$

$$\tau = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta S} = \frac{dT}{dS} \quad (1-5)$$

$$P = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S} = \frac{dP}{dS} \quad (1-6)$$

σ 和 τ 分别称为截面 $m-n$ 上 M 点处的正应力和剪应力, p 称为截面 $m-n$ 上 M 点处的全应力。在国际单位制中, 力的基本单位是牛顿(N), 长度的基本单位是米(M), 因此, 应力的基本单位是牛顿/平方米(N/M^2), 称作帕斯卡。应力的量纲是[力][长度] $^{-2}$ 。

在物体内的某点, 不同截面上的应力是不同的。为了分析这一点的应力状态, 即分析过 P 点的各个截面上应力的方向和大小, 可从物体内部取出一个包含此点在内的微小正六面体, 如(图 1-3)所示。

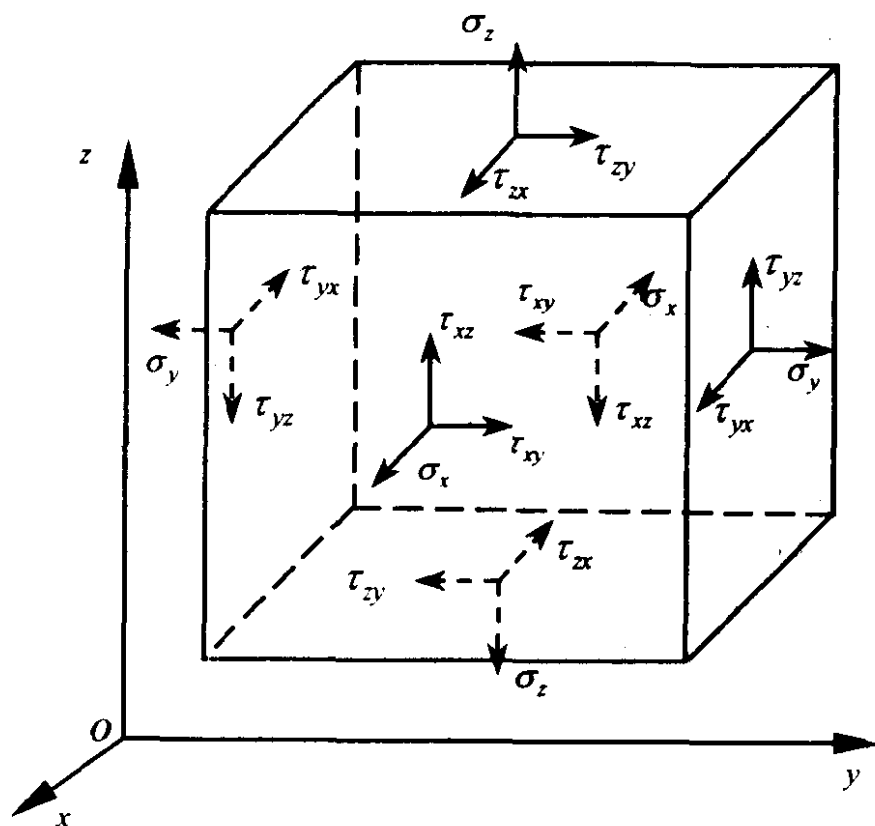


图1-3

立方体的棱平行于坐标轴,棱的长度分别用 $\Delta x, \Delta y$ 和 Δz 表示,用 ΔS_1 表示垂直于 X 轴的立方体的面,将作用在 ΔS_1 面上的应力沿坐标轴分解为三个分量,并分别表示为 σ_{xx}, τ_{xy} 和 τ_{xz} ,分量 σ_{xx} 是正应力, τ_{xy} 和 τ_{xz} 是剪应力。同样地,我们可以考虑垂直于 X 轴和 Y 轴的面 ΔS_2 和 ΔS_3 ,作用在其上的应力分别是 $\sigma_{yy}, \tau_{yx}, \tau_{yz}$ 和 $\sigma_{zz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$,其中 σ_{yy} 和 σ_{zz} 是正应力, $\tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 和 τ_{zy} 是剪应力。将它们列表如下: