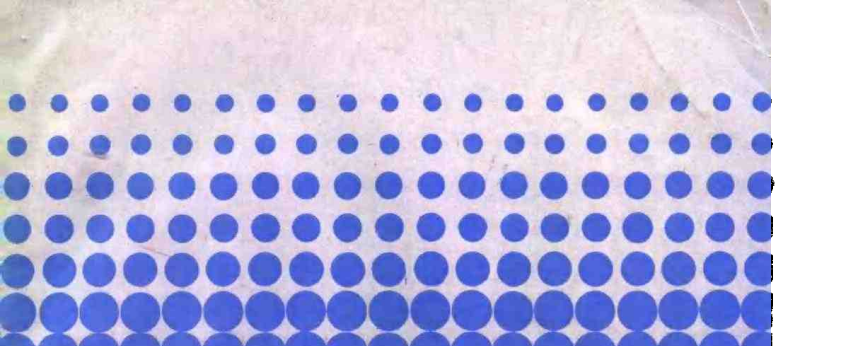




医用物理学

主编 顾启秀·余国建

上海科学技术出版社



内 容 提 要

本书是参照卫生部制定的高等中医院校《医用物理学》教学大纲(试用稿),由全国十余所中医学院参加编写的。本书共十七章,包括力、热、电、声、光、电子学及近代物理技术在医学上的应用等内容。

全书结构严谨,概念准确,文字流畅,既与中医密切联系,又反映物理技术在中医药学研究的新成果。具有实用、精练、覆盖面广、论述清晰、便于学习的特点,集科学性、完整性、系统性于一体。不仅适用于高等中医院校针灸、推拿、医疗、骨伤和中医基础理论等专业,而且可供中医科研、教学、医疗人员作为基础理论指导用书。

医 用 物 理 学

主编 顾启秀 余国建

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

发行所上海发行所发行 无锡县人民印刷厂印刷

江苏省句容排印厂排版

开本787×1092 1/16 印张19.25 字数453,000

1991年8月第1版 1991年8月第1次印刷

印数: 1-5,000

ISBN 7-5323-2449-4/R·740

定价: 9.15元

《医用物理学》编委会

- 主 编** 顾启秀(上海中医学院)
余国建(湖南中医学院)
- 副 主 编** 李松山(河南中医学院)
崔桂珍(南京中医学院)
朱翠玲(山东中医学院)
赵家骥(浙江中医学院)
- 编 委** 陈在得(福建中医学院)
黄永谦(江西中医学院)
唐志伦(贵阳中医学院)
党春兰(河南中医学院)
吴广林(辽宁中医学院)
周 慧(上海中医学院)
邵建华(上海中医学院)
吴子乔(湖南中医学院)
王雅琴(长春中医学院)
刘 颖(黑龙江中医学院)
- 学术秘书** 邵建华(兼)
- 主 审** 庄心田(安徽中医学院)

前 言

《医用物理学》是一本供高等中医院校针灸、推拿、医疗、中医基础理论等专业使用的普通基础课教学用书。该书主要参照卫生部制定的高等中医院校《医用物理学》教学大纲(试用稿),吸收国内外有关教材的优点,为适应中医走向世界,培养一批有科研能力的新颖中医专业人材创造基础条件编写而成的。本书由全国十余所中医学院有较丰富教学经验的资深教师编撰。

在编写过程中,我们根据各专业培养目标对本学科的要求,注意以辩证唯物主义为指导,力求从高等中医教学的实际出发,既保证教材的科学性、系统性和完整性,又贯彻理论联系实际和少而精的原则。同时注意总结近几年各校讲授《医用物理学》的教学经验,适当反映近年来运用本学科的理论和方法研究中医药学的新成果,力争做到学生好学,教师好教,使物理基础与医学专业结合。

为了适应不同专业、不同学时数、必修选修课不同等各种情况,书中有些内容各校可根据具体情况选用或留给学生自学。各章后面的习题均包括思考题和计算题两部分,以供不同专业学生选做。本书的主要单位和名称一律采用我国国家标准,书末列有附录以供参考。

编 者

一九九〇年五月二十二日

目 录

绪论	1
第一章 物体的弹性	3
第一节 力的平衡及其医学应用	3
第二节 应力与应变	5
第三节 弹性模量	8
第四节 粘弹性物质	10
第五节 骨骼和肌肉的力学性质	11
第二章 流体的流动	17
第一节 关于流体运动的基本概念	17
第二节 理想流体的流动	19
第三节 实际流体的流动	22
第四节 血液的流动	26
第三章 液体的表面现象	33
第一节 液体的表面张力和表面能	33
第二节 弯曲液面下的附加压强	36
第三节 毛细现象	38
第四节 表面活性物质 表面吸附	41
第四章 振动 波动和声波	45
第一节 谐振动	45
第二节 波动	51
第三节 声波	55
第四节 多普勒效应	59
第五节 超声波及其医学应用	59
第五章 静电场和生物电基础知识	64
第一节 电场 电场强度	64
第二节 电场力的功 电势	65
第三节 静电场中的电介质	67
第四节 生物电 神经传导的电学特性	69
第五节 心电的物理基础	73
第六节 人体电阻抗和电导纳	75
第七节 生物信息的测量	78
第六章 电流	83
第一节 一段有源电路的欧姆定律	83
第二节 基尔霍夫定律及应用	87
第三节 接触电位差 温差电动势	90
第四节 直流电对机体的作用	93
第七章 电磁现象	98
第一节 磁感应强度 安培环路定理	98
第二节 带电粒子在磁场中的运动	102
第三节 磁场对载流导体的作用	104
第四节 电磁感应	105
第五节 生物磁现象 磁疗	108
第八章 交流电	112

第一节 正弦交流电	112	第二节 纯电阻、纯电感和纯电容交流电路	113
第三节 串联谐振与并联谐振	118	第四节 电磁振荡与电磁波	120
第五节 高频电子	122	第六节 安全用电	123
第九章 医用光学仪器的基本原理	126		
第一节 单球面折射与其轴球面系统	126	第二节 透镜	128
第三节 眼睛的屈光系统	130	第四节 放大镜	134
第五节 检眼镜 纤维镜	134	第六节 显微镜	136
第七节 旋光糖量计	141		
第十章 光的辐射	144		
第一节 黑体辐射	144	第二节 非温度辐射	147
第三节 红外线和紫外线	148	第四节 光度学基本知识	150
第五节 光的吸收	153		
第十一章 量子物理的基本知识	156		
第一节 玻尔的氢原子理论	156	第二节 原子光谱 分子光谱	160
第三节 微观粒子的二象性	161	第四节 四个量子数	165
第五节 激光及其医学应用	166		
第十二章 X射线	172		
第一节 X射线的基本性质及发生装置	172	第二节 X射线的强度和硬度	173
第三节 X射线谱	174	第四节 物质对X射线的吸收 规律	177
第五节 X射线的医学应用	179		
第十三章 核医学物理基础	182		
第一节 原子核的组成与衰变类型	182	第二节 放射性衰变的规律	183
第三节 射线与物质的相互作用	186	第四节 辐射量与辐射防护	187
第五节 放射线的探测方法	190	第六节 放射性核素在医学上的应用	192
第十四章 晶体管电路基础	194		
第一节 晶体二极管	194	第二节 晶体三极管	198
第三节 交流放大电路	204	第四节 阻容耦合放大器	212
第五节 晶体管放大作用的应用实例	214		
第十五章 晶体管放大器和直流稳压电源	217		
第一节 负反馈放大器	217	第二节 功率放大器	222
第三节 直流放大器	226	第四节 集成运算放大器	229
第五节 直流稳压电源	234		

第十六章 振荡电路与脉冲数字电路基础	242
第一节 正弦波振荡器.....	242
第二节 脉冲电路基本知识.....	244
第三节 门电路.....	247
第四节 触发电路.....	251
第五节 多谐振荡器.....	253
第六节 间歇振荡器.....	254
第七节 阅读整机电子线路的一般方法...	256
第十七章 现代科学技术在医学上的渗透和发展	261
第一节 与医用物理学有关的边缘学科...	261
第二节 新技术在医学上的一些应用.....	265
第三节 应用物理原理解释心脏瓣膜启闭原理.....	278
第四节 骨骼肌纤维的收缩滑移理论.....	280
第五节 系统论、信息论、控制论与中医...	281
第六节 电子计算机在中医诊疗上的应用...	285
附录一 物理量和单位	287
附录二 常用常数表	294
附录三 国产半导体器件型号的命名方法	296
附录四 希腊字母表	297

绪 论

物质存在的最基本性质就是运动,它包括各种机械运动、变化、生长、相互作用和相互联系等过程。各种自然现象如天体运动、化学变化、动植物的生长和生殖过程、生命现象等,都是以不同形态的物质运动表现的。其中最简单的物质运动形态是机械运动,而生命现象则是高级的复杂的物质运动形态。

物理学是一门自然科学,它对现代科学技术和医学的发展起着重要作用。学习物理学有助于树立辩证唯物主义观点,培养分析问题和解决问题的能力。了解物理学在生产实践和医学科学中应用和发展情况,为学习后继课程准备条件,并适应将来工作和继续提高的需要,以适应中医国际化的发展趋势。

一、物理学的研究对象

各门科学都是以各种不同的物质运动形式作为自己的研究对象。物理学所研究的物质运动形态具有最基本和最普遍的性质,它存在于一切高级的复杂的(如生物的)运动之中。具体地说,物理学研究的内容就是力学现象与实物的结构和状态有关的现象、各种场的性质、场和实物的相互作用等等。按照现象和过程可分为:力学、声学、热学、电学和磁学、光学、原子过程和原子核过程的理论等部份。

由于物质运动形态都是互相联系、不能彼此分割的,因此它们的界线不可能划得十分清楚。物理学研究它们的特殊矛盾和本质,它们之间的联系和影响,以及找出这些运动形式的各自的共同规律。

二、物理学研究方法

物理学的研究方法是观察、实验、假说和理论。其中观察和实验是研究物理的基础。观察是在自然条件下按照原来的样子加以观测研究,它仅仅是一种初步研究。实验是在人为的条件下使现象反复重演,从而研究现象中各种因素间的因果关系。在实验时必须尽可能地把影响现象的主要因素和次要因素分开,使问题简化,这样才能找到最本质的东西。

在观察和实验所获得的大量资料的基础上,第二步工作就是经过分析、概括、判断和推理一系列过程,把事物的本质和内在联系抽象成更一般的形式,于是产生了假说。由假说再经过反复考验,被证明可以足够正确地反映某些客观规律时,于是导致定律和理论的建立。可见物理定律和理论不是人们硬套在自然现象身上的主观思想,而是自然现象本身所具有的客观规律性在人们头脑中的反映。

物理定律和理论建立后,还必须回到实践中去,使理论通过实践得到检验,如果在实践中发现事实和理论有矛盾时,该理论必须得到修正和发展,有时甚至放弃原有理论而建立新的更能反映客观实在的理论,从而使理论逐步地达到日益完善的程度。正确的物理定律和理论对实践具有高度的和广泛的指导作用,其重要性已为世界所公认。

三、物理学与医学关系

医学属于研究生命现象的生物科学。生命活动是一种高级的复杂的物质运动形式,它

是以物理的和化学的过程为基础的，因此物理学与医学的关系和其他科学一样是非常密切的。

1. 物理学的重大进展，将促进医学的飞跃发展。物理学的每一个新的发现或技术发展到一个新阶段，都会为生物科学和医学提供更新、更好的仪器与方法。例如显微镜的发明使生物学和医学的研究达到细胞水平，而电子显微镜的应用又使得基础和临床医学进展到超显微层次的分子和电子水平，使生物科学由宏观形态的研究进入微观机制的探讨，这样将更深入触及到生命现象的微观本质。目前各门医学科学都愈来愈多地把它们的理论建立在物理基础上。物理学与生物学、医学的相互促进和相互渗透已经形成了医用物理学、生物物理学、医学物理学、生物力学、生物医学工程、循环力学、血液流变学等边缘科学，它们对阐明生命现象的本质和对生物体(主要是人体)，进行探索和改造作出了许多贡献。

2. 物理学是学习医学和了解生命现象所不可缺少的基础。例如，要了解血液在心血管系统中的运动情况，必须掌握流体力学基本定律；要了解骨骼和肌肉的作用，必须具备力学知识；要了解感觉过程以及超声的医学应用，必须知道声波的物理性质和传播规律。人体内的电磁是神经与肌肉组织中的一种基本活动，如肌电、脑电、心电、心磁、脑磁等等，亦必须具备有关电磁学知识。因此没有物理学基础是不可能通晓许多医学课题的。

3. 物理学所提供的方法和技术，为基础医学、中西医结合治疗和科学研究开辟了新的途径。电针、激光针、脉象仪、针灸、推拿手法仪及四诊客观化等均已为祖国医学增添了新的内容；按照物理学基本原理制造的各种医用器械，光学、电学、电子学仪器的不断更新为医学实践和科学研究提供了有效的工具。电子计算机在研究祖国医学的基本理论和临床应用上，也将发挥积极作用；放射线 and 同位素广泛应用于诊断疾病、治疗肿瘤以及正常生理和病理机理的研究；用顺磁共振法研究有机体内的游离基的浓度等均为癌症早期诊断和治疗开辟了新的途径。可以预料，这些新方法、新技术的逐步推广，必将使医学科学不断发展和提高。由此可知，学习医用物理课程，既是为本专业后继课程打基础，也是将来从事走向现代化的医疗卫生和科学研究工作的需要。

第一章 物体的弹性

在力学中,我们把静止状态、匀速直线运动状态以及匀速转动状态称为平衡状态。研究物体处于平衡状态时所应满足的条件和规律,是研讨人体关节力学所必备的基础知识。

研究物体的平衡时,我们常忽略在外力作用下物体的形状或大小的改变。实际上,任何一个物体在外力的作用下它的形状或大小都要发生变化。物体的形状或大小的改变与引起这一改变的力之间的关系,即物体的弹性与范性问题,不仅对工程技术,而且对生物学、医学和医学工程学都有重要意义。

本章除讨论物体的平衡条件、有关物体弹性的基本知识外,还将简略介绍骨骼和肌肉的力学性质。

第一节 力的平衡及其医学应用

一、力的平衡

当物体处于平衡状态时,物体的线加速度必须为零,由牛顿第二定律可知,作用在该物体上的外力的矢量和必须为零。同时,该物体的角加速度也必须为零,而由转动定律可知,作用在该物体上的外力对任一转轴的力矩之和也必须为零。这就是使物体处于平衡状态时所应该满足的条件。用数学式子把它表达出来,

即

$$\left. \begin{array}{l} \sum F_i = 0 \\ \sum M_i = 0 \end{array} \right\} \quad (1-1)$$

应该指出,方程组(1-1)中的力矩之和也是矢量和。在某些特殊情况下它才是代数和。

二、两种常见的力的平衡

1. 共点力系的平衡 拉密定理 一个物体同时受到几个外力的作用,如果这些外力的作用点为一点,或这些外力的作用线或作用线的延长线相交于一点,则这些外力称为共点力系。对于共点力系来说,如果它们的合力等于零,很容易证明,它们的合力矩也必然等于零。因此,物体在共点力系作用下处于平衡状态时所应该满足的条件,可以简化为共点力系的矢量和为零,即

$$\sum F_i = 0 \quad (1-2)$$

如果物体所受的共点力系由三个力组成,当该物体处于平衡状态时,由式(1-2)知这三个力的合力为零。由力的合成的多边形法则知,这三个力必然组成一个三角形。三角形的三条边一定处于同一平面内。

设三个力 f_1 、 f_2 、 f_3 构成平衡的共点力系。按力的合成的多边形法则三个力 f_1 、 f_2 和 f_3 必

然组成一个三角形且同在一个平面内,如图 1-1 所示。由正弦定理知:

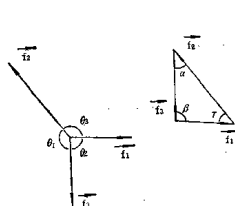


图 1-1 共点力系的三力平衡拉密定理

$$\frac{f_1}{\sin \alpha} = \frac{f_2}{\sin \beta} = \frac{f_3}{\sin \gamma}$$

由于 $\alpha = \pi - \theta_1, \beta = \pi - \theta_2, \gamma = \pi - \theta_3$, 故有

$$\frac{f_1}{\sin \theta_1} = \frac{f_2}{\sin \theta_2} = \frac{f_3}{\sin \theta_3} \quad (1-3)$$

公式 (1-3) 称为拉密定理。它表明: 一个物体受到由三个力构成的共点力系的作用而处于平衡状态时, 其中每个力的大小与其它两个力所夹角的正弦成正比, 这三个力共处同一平面内。

拉密定理是两个独立的方程式, 即它为一个方程组, 其中有五个变量: 三个力的大小和两个角。在五个变量中如有三个为已知, 就可以求得其余的两变量。

如果物体所受的共点力系由四个或四个以上的力组成, 一般情况下这些力为空间力。当该物体处于平衡状态时, 它所应该满足式 (1-2) 的条件, 在空间坐标系中为:

$$\left. \begin{aligned} \sum F_{ix} &= 0 \\ \sum F_{iy} &= 0 \\ \sum F_{iz} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

2. 平面力系的平衡 一个物体同时受到几个外力的作用, 如果这些外力的作用线共处于同一平面内, 则这些外力构成平面力系。对于平面力系来说, 它们对任一轴的力矩只有正、负两个方向之分。并且, 这些外力也只在平面坐标系内分解。因此, 物体在平面力系作用下处于平衡状态时所应满足的条件, 可以写为:

$$\left. \begin{aligned} \sum F_{ix} &= 0 \\ \sum F_{iy} &= 0 \\ \sum M_i &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

公式 (1-5) 中的力矩之和是代数数。

三、力的平衡应用于人体受力分析

1. 作用在髋关节上的力 我们应用力的平衡来确定单足站立时髋关节上受的作用力。现将站立的下肢隔离出来, 分析其受力情况, 见图 1-2。地面的支持力 N 。已知其大小等于体重, 方向竖直向上, 作用点在站立下肢的足底。站立下肢的重力 W 。已知其大小等于 $1/6$ 体重, 方向竖直向下, 作用点在下肢的重心。髋外展肌力 M 。已知其作用点为髋外展肌在股骨上段的附着点, 它的方向受单足站立时身体的姿势, 特别是骨盆的倾斜度的影响。设力 M 与水平方向的夹角为 α , 当骨盆处于中立位置时, α 约为 60° 。力 M 的大小为未知。

髋关节上的作用力, 即髋臼施于股骨头上的作用力 J 。已知其作用

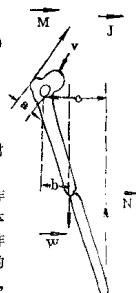


图 1-2 站立下肢受力图

点由 X 照片确定,未知其大小和方向。

上述四个力可视为平面力系。根据物体在平面力系作用下处于平衡状态时所应满足的条件式(1-5),则可列出下面的方程组:

$$\begin{cases} M \cos \alpha - J_x = 0 \\ M \sin \alpha + N - W - J_y = 0 \\ M \cdot a + W \cdot b - N \cdot c = 0 \end{cases}$$

上述方程组中 a, b, c 分别是力 M, W 和 N 对过股骨头中心 O 的转动轴的力臂,它们可由 X 照片确定,是已知的。方程组中只有 M, J_x 和 J_y 是未知的,从而可以求解。对于单足站立骨盆处于中立位置的正常人来说,解得的结果是:髂外展肌力 M 的大小为体重的二倍,髋关节上的作用力 J ,其大小是体重的 2.75 倍,它的方向与水平方向的夹角是 69° 。

2. 作用在踝关节上的力 应用力的平衡再来确定行走时足跟刚要离地这一瞬间踝关节上受的作用力。这里把足视为隔离物,它的受力图见图 1-3。为了简化,我们把行走时的这一瞬间仍作为平衡状态处理,同时略去足本身的重力。

地面的支持力 N 。由于行走时足跟刚要离地瞬间另一足尚未着地,故而地面的支持力其大小等于体重。它的方向竖直向上,作用点在足前掌与距关节施力点间的水平距离约为 $b=15.2\text{cm}$ 。

跟腱力 M 。已知其方向沿跟腱竖直向上,作用点是跟腱在跟骨上的附着点,和距关节施力点间的水平距离约为 $a=3.8\text{cm}$,未知其大小。

距关节上的作用力 J 。其作用点即施力点由解剖学结构确定,是已知的。未知其大小和方向。

上述三个力可视为平面力系。由于力 N 和 M 均在竖直方向上,由物体处于平衡状态时的条件之一:外力的矢量和为零,可以得知,距关节上的作用力 J 的方向为竖直向下的,并且它的大小为:

$$J = M + N$$

由物体处于平衡状态时的另一条件:外力的力矩之和为零,选关节作用力 J 的作用点为转动轴,则

$$M \cdot a = N \cdot b$$

将 a, b 的数值代入,从而得到 $M=4N$ 以及 $J=5N$ 。即跟腱力约为体重的四倍,距关节上的作用力约为体重的五倍。

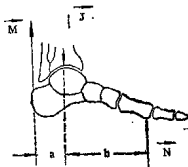


图 1-3 足跟刚要离地瞬间踝关节受力图

第二节 应力与应变

一、正应力和正应变

图 1-4 表示横截面积为 S 的棒,在棒的两端各加大小相等而方向相反的力 F 。图 1-4(a)表示棒受到拉力的情况,称棒处于张力状态;图 1-4(b)表示棒受到压力的情况,称棒处于压

力状态。设想在棒中作一与棒轴垂直的截面,如图中虚线所示。由于外力 F 的作用,通过棒对力 F 的传递,棒内截面两侧部分互施有一个大小相等、方向相反的作用力与反作用力,我们称它们为内力。图 1-4 中所示的内力,其大小也是 F ,方向与截面垂直。应该指出,物体所受到的外界的作用力为外力。物体受外力作用而变形,同时在物体内部各部分之间产生相互的作用力。这种物体内部的相互作用力为内力。在本例中,内力是由外力引发的。

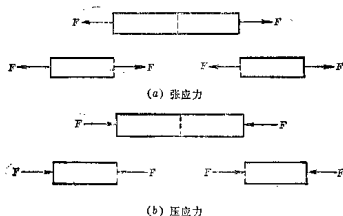


图 1-4 正应力作用下的棒

我们把垂直作用在物体某截面上的内力 F 与该截面面积 S 的比值,定义为物体在此截面处所受的正应力。图 1-4(a)表示的是张应力,图 1-4(b)表示的是压应力。以 σ 表示正应力,则

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1-6)$$

物体受到拉力或压力的作用时,在忽略它的体积变化的情况下,物体所发生的形变就是它的长度变化。例如一根细长的棒受正应力的情况。设细棒原来的长度为 l_0 ,在外力作用下细棒受到正应力作用其长度改变到 l ,长度的改变量则为 $\Delta l = l - l_0$ 。实验表明:不同大小的外力使棒受到的正应力不同,引起的长度改变量不同;同样大小的外力使棒受到同样大小的正应力,由于细棒原长不同而引起的长度改变量也不同。但是,在细棒受到一定正应力的情况下,细棒长度的改变量 Δl 与其原长 l_0 的比值却是一定的。我们定义物体在正应力作用下单位长度所发生的改变量,即比值 $\Delta l/l_0$ 为正应变。正应变反映着物体形变的程度。以 ϵ 表示正应变,则有

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1-7)$$

对于物体受张应力而伸长的情况, $\Delta l > 0$,称为张应变;对于物体受压应力而缩短的情况, $\Delta l < 0$,称为压应变。

二、切应力和切应变

物体受外力作用的另一种情况是外力的方向和它的作用面相平行,如图 1-5 所示。图中物体原为立方体,受外力 F 的作用后发生形变而为平行六面体。设想一个与物体上、下底面平行的截面,如图中虚线所示。由力的传递截面上、下两部分也互施有内力,它们是大小相等、方向相反的作用力与反作用力。图 1-5 中所示的内力,其大小等于外力 F ,方向与截面平行。我们把平行作用在物体某截面上的内力 F 与该截面面积 S 的比值,定义为物体在

此截面处所受的切应力,以 τ 表示则有

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (1-8)$$

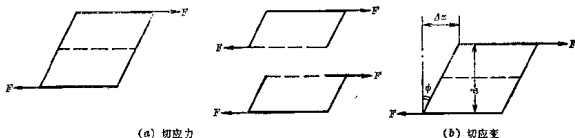


图 1-5 切应力作用下发生切应变

实验表明:物体受切应力作用时,它只有形状的变化而没有体积的改变,并且,与底面距离不同的截面移动的距离也不同。但是,某截面移动的距离 Δx 与该截面到底面的距离 d (见图1-5)的比值,在一定的切应力作用下对不同的截面来说都是相等的。我们称这一比值为切应变。它反映着物体发生切变的程度。以 γ 表示切应变,则有

$$\gamma = \frac{\Delta x}{d} = \tan \phi \quad (1-8)$$

式中 ϕ 角为物体从立方体切变为平行六面体时的倾角,如图1-5(b)所示。在角 ϕ 很小的情况下,上式可以写成

$$\gamma = \phi \quad (1-9)$$

三、体应变

物体受某种外力的作用,其形状不发生改变只发生体积的变化时,其体积的改变量 ΔV 与原体积 V_0 的比值,称为体应变。以 θ 表示体应变,则有

$$\theta = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (1-10)$$

引起体应变的应力常由物体所受的来自各个方向的均匀压强所产生。如等温条件下气体的压强改变所引起的气体体积的变化。对流体的热胀冷缩,血液在心脏和主动脉中的流动,肺的呼吸等情况,体应变的概念常被用到。

综上所述,应力就是作用在单位截面上的内力,它反映着物体受外界因素作用时,其内部各部分之间力的相互作用情况。应力的单位是Pa(帕斯卡), $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$ 。应变是反映物体受外界因素作用而产生应力时,所引起的形状或大小的相对改变程度的一个物理量。

应该指出:一定的外力,在物体的不同截面处所产生的内力以及相应的应力一般说来是不相同的,并且内力也不一定等于外力。物体内部各处应力的大小和方向的分布情况,称为应力分布。为形象描述应力分布,我们引入应力线概念。应力线是在物体内部设想的一组曲线,曲线上各点的切线方向是该点处的应力方向,曲线的密集程度反映该点处应力的

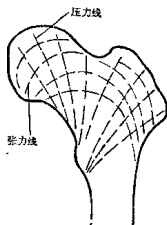


图 1-6 股骨上段应力分布

大小。例如人体体重和地面支持力经过传递作用于人的股骨上段,由这些外力所引起的股

骨上段内部的应力分布如图 1-6 所示。图中虚线为应力线，它分为两组，一组为压力线，一组为张力线。沿压力线方向股骨上段受到的是压应力，即受挤压；沿张力线方向股骨上段受到的是张应力，即受拉伸。股骨上段在应力线密集的部位受到的应力大，稀疏的部位受到的应力小。

应力的产生以及由此发生的应变不一定非由机械外力引起。热效应也能产生应力，称为热应力。如冬天室外水管的冻裂，就是由于温度改变所引起的应力导致的。再如近年来的研究发现，骨骼中存在着逆压电效应，即在骨骼中施加一个电场，可以在其中产生应力和应变，这是由电的因素所导致的。

还应该指出：物体受应力作用实际所发生的应变并非单一的正应变或切应变形式，而是很复杂的，它们可能同时发生。但复杂的应变形式都是由正应变与切应变组合而成的。

例 1-1 人骨骼上的肱二头肌，可对相连的骨骼施加大约 600N 的力。设肱二头肌横截面积平均为 $S_1 = 5.0 \times 10^{-3} \text{m}^2$ 。腱将肌肉的下端联到肘关节下面的骨骼上，设腱的横截面积为 $S_2 = 5.0 \times 10^{-3} \text{m}^2$ 。试求肱二头肌和腱的张应力。

解 根据张应力定义公式 (1-6)，对肱二头肌而言，张应力为

$$\sigma_1 = \frac{F}{S_1} = \frac{600}{5.0 \times 10^{-3}} = 1.2 \times 10^5 \text{Pa}$$

对腱而言，张应力为

$$\sigma_2 = \frac{F}{S_2} = \frac{600}{5.0 \times 10^{-3}} = 1.2 \times 10^5 \text{Pa}$$

第三节 弹性模量

一、物体的弹性与范性

应力和由它产生的应变之间的关系，对不同材料来说互不相同，但都有着共同的基本

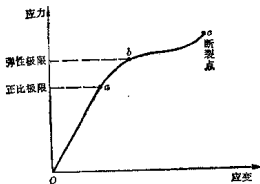


图 1-7 应力-应变关系曲线

特征。图 1-7 给出金属材料的典型张应力与张应变之间的关系曲线。曲线的开始部分由 O 点到 a 点，应变和应力间呈现出正比关系，a 点所对应的应力是应力、应变呈正比关系时的最大应力，称为正比极限。由 a 点到 b 点应变和应力不再成正比。但是，在由 O 点到 b 点的范围内，当除去外力时材料都能恢复原来的形状和大小，我们称材料处于弹性形变范围内，b 点对应的应力是材料处于弹性形变范围内的最大应力，称为弹性极限，b 点又

称为屈服点。在弹性形变范围内，物体呈现出弹性。超过弹性形变范围，即超过屈服点 b 以后，当除去外力时材料已不能恢复原来的形状和大小，出现了永久变形，我们称材料发生了范性形变。在范性形变范围内，物体呈现出范性。当应力继续增大，达到 c 点时，材料断裂，称 c 点为断裂点，并称这时的应力为材料的抗断强度。物体受张应力的作用，发生断裂时的张应力称抗张强度。物体受压应力的作用，发生断裂时的压应力称抗压强度。能发

生较大的范性形变的材料,即应力-应变关系曲线中bc段的应变范围较大,我们称这种材料具有延展性,反之称材料具有脆性。

二、弹性模量

在应力-应变关系曲线中的正比极限范围内,材料的应变与它所受应力成正比的这一规律称为胡克(Hooke)定律。应力与应变的比值称为该材料的弹性模量。不同材料具有不同的弹性模量,同一材料的弹性模量为一定常值。以下讨论几种不同情况的弹性模量。

当物体发生正应变时,在正比极限范围内,正应力 σ 与正应变 ε 的比值,称为杨氏(Young's)模量,以 E 表示弹性模量,则

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F \cdot l_0}{S \cdot \Delta l} \quad (1-11)$$

在发生切应变的情况下,在正比极限范围内切应力 τ 与切应变 γ 的比值,称为该材料的切变模量,以 G 表示,则有

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{F \cdot d}{S \cdot \Delta x} \quad (1-12)$$

当物体发生体应变时,设压强的增量为 ΔP ,相应的体应变是 θ ,在正比极限范围内相应的弹性模量称为体积模量,以 K 表示,则

$$K = -\frac{\Delta P}{\theta} = -V_0 \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (1-13)$$

式中负号表示一般情况下压强增大时体积缩小。

体积模量的倒数,称为压缩系数,以 k 表示,则有

$$k = \frac{1}{K} = -\frac{1}{V_0} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta P} \quad (1-14)$$

一部分材料的弹性模量见表1-1,表1-2则给出一些材料的切变模量和体积模量。弹性模量、切变模量和体积模量的单位均为Pa,压缩系数的单位是 Pa^{-1} 。

表 1-1 一些材料的弹性模量、弹性极限和抗张强度

物 质	弹性模量 ($\times 10^9 \text{Pa}$)	弹性极限 ($\times 10^7 \text{Pa}$)	抗张强度 ($\times 10^7 \text{Pa}$)	抗压强度 ($\times 10^7 \text{Pa}$)
铝	70	18	20	
黄拉伸	18		12	
常压缩	9			17
铜	20			4
铝	110	20	40	
玻璃	70		5.0	110
花岗岩	50			20
熟铁	190	17	33	
聚苯乙烯	3		5	10
钢	200	30	50	
木材	10			10
橡胶	0.020			
橡胶	0.0010			
血管	0.00020			

表 1-2 一些材料的切变模量和体积模量

物 质	切变模量 ($\times 10^{10}$ Pa)	体积模量 ($\times 10^{10}$ Pa)
铝	25	70
铜	40	120
铁	50	80
玻 璃	30	36
钢	80	158
瓷	140	
木 材	10	
长 骨	10	

例 1-2 设某人的股骨长 0.40m, 横截面积平均为 5.0cm^2 , 他的体重约 500N。试求当此人站立时他的股骨缩短多少?

解 人的两条腿支持体重, 每条腿承受体重一半, 即 $F=250\text{N}$ 。由表 1-1 查得在压缩的情况下, 骨的弹性模量 $E=9 \times 10^9 \text{Pa}$, 根据公式(1-11), 可得到他的股骨缩短了

$$\Delta l = \frac{F \cdot l_0}{S \cdot E} = \frac{250 \times 0.40}{5.0 \times 10^{-4} \times 9 \times 10^9} = 2 \times 10^{-5} \text{m}$$

第四节 粘弹性物质

上节我们讨论物质材料的应力、应变关系时, 认为当材料受有一定应力时其应变是立即达到一个恒定值的。即物质材料的应力、应变间——对应关系的建立没有时间的效应。另一类物质, 例如橡胶、油漆、各种生物材料以及药物中的一些外用膏膏等, 它们的变形性质不同于上一类物质。它们的应力、应变达到稳定状态时的一一对应关系的建立不是立即达到的, 而需要一个时间过程。我们称这类物质为粘弹性物质。

一、粘弹性物质应力-应变关系的动态特性

粘弹性物质受有应力而产生应变时, 应变不是立即达到稳定状态, 而是经历一个动态过程。即, 对粘弹性体施加恒定应力时, 它开始有一迅速的较大应变, 而随后有一缓慢的继续应变过程, 最后才达到具有恒定应变量的稳定状态。这种现象称为蠕变。也就是说, 粘弹性物质在恒定应力作用下, 其应变有一个随时间不断增大最后才达到恒定值的过程。

若要使粘弹性物质迅速达到恒定的应变值, 则相应的应力一开始要大些, 然后才能逐步减小到稳定值。也就是说, 在发生恒定应变的情况下, 粘弹性物质所受应力有一个随时间不断减小最后才达到恒定值的过程。这种现象称为应力松弛, 或称应力弛豫现象。

对粘弹性物体做周期性加载和卸载, 则加载时的应力-应变关系曲线同卸载时的应力-应变关系曲线不相重合, 这一现象称为滞后, 或称迟滞。一般说来, 开始几次循环加载所得到的应力-应变关系曲线彼此也不重合, 经多次循环加载后, 应力-应变关系曲线才能达到稳定, 并且加载时与卸载时的应力-应变关系曲线能形成一个闭合环, 此闭合环称为滞后环, 或称迟滞环。滞后环的大小与周期性加载、卸载的速度有关。滞后环所围面积代表着粘弹性物体在周期性应变过程中所损耗的能量。不同的粘弹性物质, 在相同的循环加载速度下其滞后环的面积大小不同, 表示其损耗的能量不等。