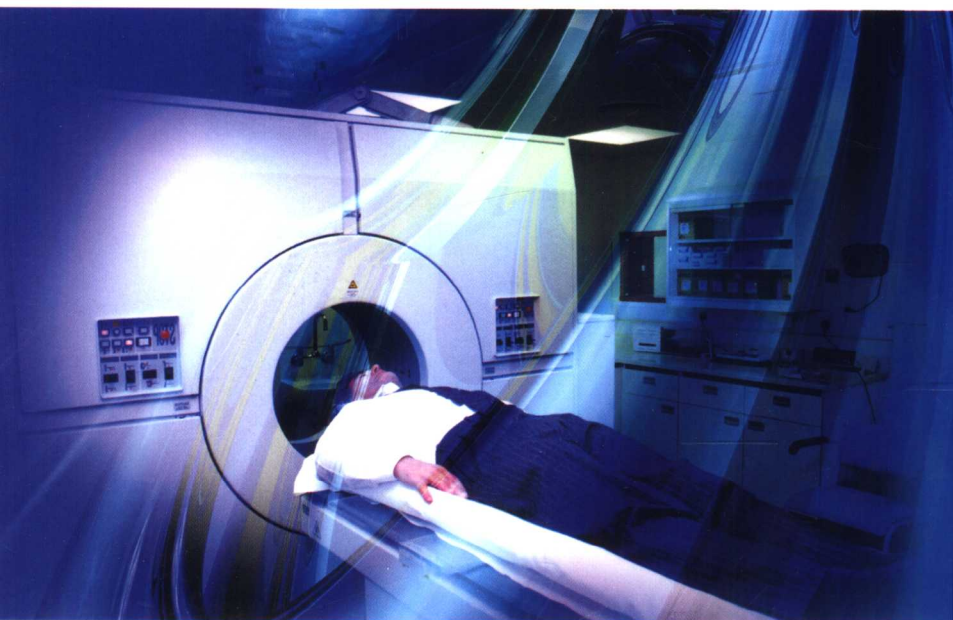


高等医学院校教材

医学物理学

主编 李田勋 赵仁宏



北京大学医学出版社

高等医学院校教材

医学物理学

主 编：李田勳 赵仁宏
副主编：吕 磊 邱召运 童家明
编 者：阮晓声（浙江大学）
吴明海（山东大学）
童家明（青岛大学）
谢利德（承德医学院）
李光仲（滨州医学院）
董兵超（新乡医学院）
李田勳（潍坊医学院）
赵仁宏（潍坊医学院）
吕 磊（潍坊医学院）
邱召运（潍坊医学院）
刘发明（潍坊医学院）
李淑玮（潍坊医学院）
赵清滨（潍坊医学院）

北京大学医学出版社

YIXUE WULIXUE

图书在版编目 (CIP) 数据

医学物理学/李田勋、赵仁宏主编. —北京: 北京大学医学出版社, 2005.7

ISBN 7-81071-850-9

I. 医... II. ①李... ②赵... III. 医用物理学—医学院校—教材 IV. R312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 072476 号

医学物理学

主 编: 李田勋 赵仁宏

出版发行: 北京大学医学出版社 (电话: 010-82802230)

地 址: (100083) 北京市海淀区学院路 38 号 北京大学医学部院内

网 址: <http://www.pumpress.com.cn>

E-mail: booksale@bjmu.edu.cn

印 刷: 北京东方圣雅印刷有限公司

经 销: 新华书店

责任编辑: 韩忠刚 责任校对: 杜悦 责任印制: 郭桂兰

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 16.25 字数: 408 千字

版 次: 2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷 印数: 1-5000 册

书 号: ISBN 7-81071-850-9/R·850

定 价: 24.50 元

版权所有, 违者必究

(凡属质量问题请与本社发行部联系退换)

序 言

物理学是研究物质运动的普遍性质和基本规律的科学，是自然科学的基础学科。物理学理论在自然界中具有最基本、最普遍的意义，一切自然现象都与它有着不可分割的关系，物理学的基本知识成为研究任何科学技术所不可缺少的基础。

医学物理学是应用性很强的学科，它运用物理学的基本原理和方法，从物质运动的普遍规律出发，加以解释和描述生命过程中的各种现象。运用物理学理论及技术了解生命现象的生理、病理过程，解决疾病的预防、诊断、治疗和康复问题。物理学理论和技术上的重大发现，都会推动生命科学理论和研究技术上的进步。所以，从事生命科学研究和实践的人们必须要具备一定的物理学方面的知识。

欣闻李田勋教授等编著的《医学物理学》即将出版，此教材加强了理论与实践的结合，新知识与基础知识的结合，必修知识和科学素养的协调，知识性和参考资料的协同，相信它对医学生的教育工作会起到促进作用。

2005年6月于北京

中国高等教育学会
医学教育专业委员会会长

王德炳

前 言

本书是根据卫生部颁发的高等医药院校医用物理学教学大纲和全国高等医药院校医学物理教学改革会议精神，充分吸收了国内外有关教材的优点和精华，结合高等院校改革和发展的新形势，依据各层次学生的知识需求，总结了多年来的教学实践和改革经验，由山东大学、浙江大学、青岛大学、承德医学院、滨州医学院、新乡医学院、潍坊医学院的一线教师共同编写而成的。

本书在教材内容的选取上，加强了理论与实践的结合，新知识与基础知识的结合，必修知识和科学素养的协调，知识性和参考资料的协同，突出了物理学与医学的结合，增加了教材的知识性、实用性、趣味性和资料性，现代物理学的许多新发现和具有争议的热点问题也出现在教材中。物理科学家的故事，对学生的成长和思维模式的培养意义非凡。

全书共分十一章，基本覆盖了医学专业所需要的物理学的基本理论及其在医学中的主要应用，结合各院校的特点及各层次学生的知识需求，增补了科学家简介、物理学最新发现和物理因子的医学应用。该教材内容充实精炼，知识层面更加丰富，物理和医学领域内的新概念、新理论、新方法得到了很好的充实，能够使学生了解到近代物理和医学发展状况、科学家的趣闻、趣事、物理学重大发现的过程，启发学生的思维方法，丰富了医学生的思维模式。该教材同时具备了教科书、科普读物、科研资料、新技术手册等功能。是一本特点鲜明、内容精炼、知识面广博、易学易懂的教材。

本书适合高等医药院校五年制和七年制基础、临床、预防、口腔、影像、麻醉、护理、药学、生物技术、医院管理等医学类专业的物理学教材，也可作为与生命科学有关的其他专业的研究生、教师的科研和教学参考书。

本书的编写得到了潍坊医学院的领导以及编者所在大学领导的关心和支持，得到北京大学医学出版社的领导 and 责任编辑的支持，在此表示衷心的感谢！对热情支持本书编写的国内外专家、教授表示诚挚的谢意。对引用文献的专家、教授深表敬意。

由于编者水平所限，书中不足之处在所难免，我们诚恳地希望使用本书的教师和同学给予帮助和指正。

编 者

2005年6月

目 录

绪 论	1	二、伯努利方程的应用	29
一、物理学是自然科学的先锋	1	第三节 粘性流体的流动	31
二、物理学是推动医学发展的主要力量	1	一、层流和湍流	31
三、物理学和生命科学的关系	2	二、牛顿粘滞定律	32
第一章 生物力学	3	三、雷诺数	33
第一节 应变和应力	3	第四节 粘性流体的运动规律	34
一、应 变	3	一、粘性流体的伯努利方程	34
二、应 力	4	二、泊肃叶定律	34
第二节 弹性模量	5	三、斯托克司定律	36
一、弹性和塑性	6	第五节 血液在循环系统中的流动	37
二、弹性模量	6	一、血液的组成及特性	37
第三节 骨与肌肉的力学特性	8	二、心脏做功	38
一、骨骼的力学性质	9	三、血流速度分布	39
二、肌肉的力学特性	11	四、血流过程中的血压分布	40
第四节 应力分析与测量	13	习 题	41
一、有限元分析法	13	霍 金	42
二、应力测量	14	黑洞理论	42
第五节 生物材料的粘弹性	17	第三章 振动与波动	44
一、生物材料的结构特点	17	第一节 简谐振动	44
二、生物材料的粘弹性	17	一、简谐振动方程	44
三、粘弹性材料的力学模型	19	二、简谐振动的特征量	45
习 题	20	三、简谐振动的矢量图示法	46
科学家介绍——牛顿的故事	21	四、简谐振动的能量	46
今日物理趣闻混沌理论	22	第二节 阻尼振动、受迫振动和共振	48
第二章 流体力学	25	一、阻尼振动	48
第一节 理想流体 稳定流动	25	二、受迫振动	49
一、理想流体	25	三、共 振	50
二、稳定流动	25	第三节 简谐振动的合成	51
三、连续性方程	26	一、两个同方向、同频率简谐振动的合成	51
第二节 伯努利方程	27	二、同方向、不同频率的简谐振动的合成	52
一、伯努利方程	27	三、谐振分析	53

四、两个同频率、互相垂直的简谐振动的合成	54	一、电荷 库仑定律	86
第四节 机械波	55	二、电场与电场强度	87
一、机械波的产生	55	三、场强叠加原理	88
二、波面和波线	56	四、电场强度的计算	88
三、波速、波长、波的周期和频率	56	第二节 高斯定理	89
第五节 简谐波	57	一、电场线和电通量	89
一、波函数	57	二、高斯定理	90
二、波动方程	58	三、高斯定理的应用举例	92
第六节 波的能量	58	第三节 电 势	93
一、波的能量和强度	58	一、静电场的环路定理	93
二、波的衰减	59	二、电 势	94
第七节 波的干涉	60	三、电势叠加原理	95
一、惠更斯原理	60	四、电场强度与电势的关系	96
二、波的叠加原理	61	第四节 电偶极子 电偶层	97
三、波的干涉	61	一、电偶极子的电场	97
四、调幅波	62	二、电偶层	98
五、驻 波	63	第五节 静电场中的电介质	99
习 题	65	一、电介质的极化	99
扫描隧道显微镜	67	二、电介质中的静电场	101
路易斯·德布罗意	67	三、电位移 有介质存在时的高斯定理	102
第四章 超声医学的物理基础	69	四、电容器及其电容	104
第一节 声 波	69	五、静电场的能量	104
一、声压和声强	69	第六节 心电知识	106
二、听觉区域	74	一、心电场	106
三、声强级和响度级	75	二、心电图	108
第二节 多普勒效应	77	三、心电图导联	108
一、多普勒效应	77	习 题	109
二、冲击波	79	玻 尔	110
第三节 超声波及其医学应用	79	宇宙大爆炸	111
一、超声波的特性	79	第六章 稳恒磁场	112
二、超声波的产生与探测	80	第一节 磁场 磁感应强度	113
三、超声波在医学中的应用	81	一、磁感应强度	113
习 题	84	二、磁通量 磁场中的高斯定理	114
近代物理小知识红移理论	84	第二节 电流的磁场	115
科学家简介——哈勃 (1889~1953)	85	一、毕奥-萨伐尔定律	115
第五章 静 电 场	86	二、毕奥-萨伐尔定律的应用	115
第一节 电场 电场强度	86	第三节 安培环路定理	119

第四节 磁场对电流的作用	120	习 题	164
一、磁场对运动电荷的作用	120	一个完完全全的理论家	165
二、磁场对载流导线的作用	121	最伟大的物理学家	165
三、载流线圈所受磁力矩	121	相 对 论	166
四、霍尔效应	123	第八章 X 射线	168
五、质谱仪和回旋加速器	125	第一节 X 射线的产生	168
六、电磁泵和电磁船	126	一、X 射线的产生装置	168
七、磁流体发电	127	二、X 射线的强度和硬度	170
八、生物医学电磁传感器	127	第二节 X 射线谱	171
第五节 磁介质	128	一、连续 X 射线谱	171
一、介质中的磁场	128	二、标识 X 射线谱	172
二、顺磁质、抗磁质、铁磁质	129	第三节 X 射线的基本性质	173
三、超导体及其磁学特性	130	一、X 射线的基本性质	173
第六节 磁场的生物效应	132	二、X 射线的衍射	174
一、生物磁现象	132	第四节 X 射线的衰减规律	175
二、磁场的生物效应	133	一、单色 X 射线的衰减规律	175
三、生物磁场的测定	133	二、衰减系数与波长、原子序数的 关系	176
习 题	134	第五节 X 射线的医学应用	177
麦克斯韦	136	一、治 疗	177
第七章 几何光学	141	二、诊 断	178
第一节 球面折射	141	三、X-CT	179
一、单球面折射	141	习 题	185
二、共轴球面系统	143	伦琴, X 射线的发现	185
第二节 透 镜	144	第九章 原子核和放射性	187
一、薄透镜成像公式	144	第一节 原子核的基本性质	187
二、薄透镜组合	146	一、原子核的组成、质量和大小	187
三、厚透镜	147	二、原子核的自旋	188
四、柱面透镜	149	三、原子核的核力、结合能及质量 亏损	188
五、透镜的像差	149	第二节 原子核的衰变类型	189
第三节 眼 睛	150	一、 α 衰变	189
一、眼的光学结构	150	二、 β 衰变	190
二、眼的调节	152	三、 γ 衰变和内转换	191
三、眼的分辨本领及视力	152	第三节 原子核的衰变规律	193
四、眼的屈光不正及其矫正	153	一、衰变规律	193
第四节 几种医用光学仪器	155	二、半衰期	193
一、放大镜	155	三、放射性活度	195
二、光学显微镜	156		
三、纤 镜	159		
四、特殊显微镜	159		

四、放射性平衡	195	三、激光的临床应用	223
第四节 射线与物质的相互作用	196	四、医用激光器	224
一、带电粒子与物质的相互作用	196	五、激光的危害与防护	224
二、光子与物质的相互作用	197	习 题	225
三、中子与物质的相互作用	197	激光冷却与捕陷原子	225
第五节 辐射剂量与防护及测量原理	198	自由电子激光	226
一、辐射剂量及其单位	198	第十一章 核磁共振	227
二、辐射防护	200	第一节 核磁共振的基本概念	228
三、射线测量原理	200	一、原子核的磁矩	228
第六节 放射性核素在医学上的应用	201	二、核磁共振条件和拉莫尔方程	230
一、示踪的原理	201	三、弛豫过程和弛豫时间	232
二、放射诊断	201	第二节 核磁共振谱	234
三、放射治疗	205	一、谱线宽度	234
习 题	206	二、化学位移	235
科学家介绍——居里夫妇	207	三、自旋-自旋劈裂	235
今日物理趣闻	208	第三节 磁共振成像原理	236
第十章 激光及其医学应用	212	一、磁共振成像的基本方法	236
第一节 激光的基本原理	212	二、人体的磁共振成像	237
一、粒子的能级与辐射跃迁	212	三、如何产生氢核密度 ρ 和 T_1 、 T_2 加权图像	239
二、粒子数按能级的分布	213	四、磁共振成像临床诊断的物理学依据	241
三、光学谐振腔	214	五、磁共振成像系统	243
四、激光器与激光	215	第三节 磁共振技术在医学中的应用	244
第二节 激光的特性	216	一、临床诊断应用	244
一、方向性好	217	二、医学研究应用	244
二、亮度高,强度大	217	习 题	245
三、单色性好	217	英国物理学家霍金展望科技未来	245
四、相干性好	217	附 录	246
五、偏振性好	218	附录一 国际单位制(SI)	246
第三节 激光的医学应用	218	附录二 一些单位的换算关系	247
一、激光的生物作用	219	附录三 基本物理常数	247
二、激光在基础医学研究中的应用	221		

绪 论

物理学是以认识物质的基本属性、研究物质运动规律为研究目的的学科。我们周围的所有客观实在都是物质，一切物质（包括实物和场）都在永恒不息地运动着，宇宙中一切自然现象都是物质运动的表现，这里所指的运动是广义的，它包括机械运动、变化、生长、相互作用等过程。物质运动的形式是极其多样的，各种形式的物质运动之间，相互依存而又本质上相互区别。它们既服从普遍规律，又有自己独特的规律，自然科学的分类就是根据其研究对象的不同而区分的。

一、物理学是自然科学的先锋

在所有自然科学中，只有物理学所研究的物质运动形式，具有最基本最普遍的性质。具体地说，物理学所研究的运动包括：机械运动、分子热运动、电磁运动、原子内部运动、场和实物的相互作用等。物理学所研究的运动形式，普遍存在于其他高级的、复杂的物质运动形式之中。因此，物理学所研究的规律，具有最基本、最普遍的意义，使得物理学知识成为研究其他自然科学的基础。在自然科学尚未分类的古代，物理学几乎就是全部自然科学。随着科学的发展，出现了许多自然科学分支，并陆续独立成为一门学科。由于近代科学的迅速发展和相互渗透，出现了许多和物理学直接有关的“边缘学科”，如化学物理学、物理化学、生物物理学、天体物理学、生物物理化学、生物医学工程学等。医学物理学是物理学的重要分支学科，它是现代物理学与医学相结合所形成的交叉学科。物理学上的每一次重大发现都极大地推动了其他自然科学的发展，促进科学技术和生产技术发生根本的变革。由于物理学所研究的规律具有很大的普遍性，它与哲学的关系也十分密切，物理学中许多重大发现，例如，相对论、物质的波粒二象性、基本粒子的相互转化、场和实物间相互作用等，为哲学提供了有力的证据，提高了人类认知物质世界的能力。

二、物理学是推动医学发展的主要力量

医学是以人体为研究对象的生命科学，生命现象属于物质的高级运动形式。随着现代物理学的迅速发展，人类对生命现象的认识的逐步深入，生命科学和医学已从宏观形态的研究进入微观机制的研究，从细胞水平的研究上升到分子水平的研究，并日益将其理论建立在精确的物理学基础之上。任何生命过程都是和物理过程密切相联系的。揭示生命现象的本质，诸如能量的交换、信息的传递、体内控制和调节、疾病发生机制、物理因素对机体的作用等，都必须应用物理学规律。大量事实表明，物理学在生物医学领域中的应用日益广泛和深入。医学物理学的迅速发展，正在对阐明生命现象的本质不断做出新的贡献。

另一方面，物理学所提供的技术和方法已日益广泛应用于生命科学、医学研究及临床医疗实践之中，并且不断更新。例如，光学显微镜、X线透视和照片、核磁共振成像技术、放射性核素等在医学上的应用已是人们早已熟知的。而现代电子显微镜与光学显微镜相比，分辨率提高近千倍，成为研究细胞内部超微结构的重要工具。计算机X射线断层摄影术（X-CT）与通常X线诊断相比，其灵敏度提高了百倍，磁共振成像（MRI）技术既能显示解剖

学图像，又能显示反映功能和代谢过程与生化信息的图像，为医学提供了一种崭新的诊断技术，是物理学对医学发展的重大贡献。各种光纤内窥镜的介入疗法，取代了刚性导管内窥镜，提高了疾病的诊断率和治疗效果，减轻了病人的痛苦。物理治疗除常见的热疗、电疗、光疗、放疗、超声治疗等方法外，还应用低温冷冻、微波、激光等手段。电子计算机不仅应用于研究人体生理和病理过程中的各种控制调节，而且用于辅助诊断、自动监护和医院管理。在研究生物大分子本身的结构、构象、能量状态及其变化，以及这些状态和变化与功能之间的关系方面，除应用物理学中的量子力学方法外，还普遍应用了物理学中的各种光谱和波谱技术等，如电子自旋共振谱、磁共振谱、激光拉曼谱、圆二色术、旋光色散、红外光谱、荧光偏振、X射线衍射、光散射以及激光全息等物理技术。

三、物理学和生命科学的关系

物理学在理论上和技术上的新成就不断为生命科学和医学的发展提供理论基础和技术方法。反过来，生命科学和医学的发展，又不断地向物理学提供新的研究课题，二者互相促进、相辅相成。总之，物理学与生命科学的关系可归结为两个方面：① 物理学知识是揭示生命现象不可缺少的基础；② 物理学所提供的技术和方法为生命科学的研究、临床实践开辟了许多新的途径。

高等医学院校开设医学物理学是一门重要的必修课，它的主要任务是给医学生提供系统的物理学知识，使他们在中学物理学的基础上，进一步掌握物理学的基本概念、基本规律、研究方法，扩大物理学知识的领域，为学习现代医学准备必要的物理基础。物理学作为严格的定量的自然科学的前沿学科，一直在科学技术发展中发挥极其重要的作用。物理学的发展对人类生产力的提高起到了极大的推动作用，过去是如此，现在是如此，将来也是如此！

物理学的研究方法是开发智力和提高能力的途径。物理学思想能启迪学生创新思维，是培养创造型人才的火种。物理学的知识结构体系是科学技术的母体，具有很强的科学原动力和再生能力。知识的迁移就是智慧，知识的再生就是创造。物理学中的研究方法系统、新颖，创新思想层出不穷。对大学生来说，学好物理学能很好地培养和发展自己的认知素养和创新能力。

(李田勤)

第一章 生物力学

学习要点:

1. 掌握描述物体弹性的基本概念: 形变、应变、应力模量。
2. 理解应力与应变的关系。
3. 了解骨骼和肌肉的力学特性; 了解有限元分析方法和应力的测量方法。
4. 了解生物材料的粘弹性。

自然界中, 任何物体在力的作用下都会发生或多或少的形变, 在许多实际问题中, 形变起着关键的作用。有些物理现象, 从本质上就是由形变引起的, 如声音在弹性媒质中的传播就和媒质内发生的形变密切相关。研究物体在力的作用下形变的规律, 不仅在工程技术方面, 而且在生物医学方面, 都是重要的。本章介绍一些有关物体弹性的基本概念及有关生物弹性物质的基本知识。

第一节 应变和应力

一、应变

对于一定物体, 外界物体对它的作用力称为外力, 物体内部各部分之间的相互作用力称为内力。物体受外力作用而形变, 其内部会出现因形变而产生的内力。

物体在外力作用下发生的形状和大小的改变, 称为形变。有的形变是暂时的, 有的形变是永久的。在一定形变限度内, 去掉外力后物体能够完全恢复原状的, 这种形变称为弹性形变。外力超过某一限度后, 去掉外力物体不能完全恢复原状的, 这种形变称为范性形变。较为常见的形变是长度、体积和形状三种改变。为了从数量上表示各种形变程度, 引入应变这一概念, 它表示物体受外力作用时, 其长度、形状或体积发生的相对变化。

1. 张应变 最简单的形变就是物体受到外力牵拉(或压缩)时的变化。实验表明, 物体受到外力牵拉(或压缩)时发生的长度改变量是和物体原来长度成正比的。我们用物体受到外力作用时, 发生的长度变化和物体原来长度的比值来表示变化程度, 称为张应变, 又称为拉伸应变, 用 ϵ 表示即

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

2. 体应变 物体各部分在各个方向上受到同等压强时体积发生变化而形状不变, 则体积变化 ΔV 与原体积 V_0 之比称为体应变以 θ 表示即

$$\theta = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (1-2)$$

3. 切应变 当物体受到力偶作用使物体两个平行截面间发生相对平行移动时, 这种形

变叫做剪切形变，是物体另一种基本形变，这个力偶是指一对大小相等，方向相反而作用线相互平行的力，这个力叫剪切力。物体受剪切力作用，发生只有形状变化没有体积变化的弹性形变叫切应变。如图 1-1 所示，长方形物体底面固定，其上下底面受到剪切力 F 作用，产生剪切。设两底面相对偏移位移为 Δx ，垂直距离为 d ，则剪切的程度以比值 $\frac{\Delta x}{d}$ 来衡量，这一比值称为切应变，以 γ 表示，即

$$\gamma = \frac{\Delta x}{d} = \text{tg } \varphi \quad (1-3a)$$

在实际情况下，一般 φ 角很小，上式可写成

$$\gamma \approx \varphi \quad (1-3b)$$

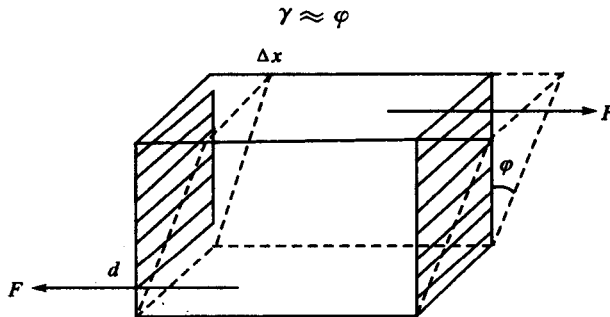


图 1-1 切应变

这三种应变都是无量纲的，没有单位。它们只是相对地表示形变程度，而与物体原来的长度、体积或形状都没有关系。

当物体被纵向拉伸时，将产生横向收缩。实验表明，横向的相对收缩与纵向的相对伸长成正比。若设物体横截面为矩形，其边长分别为 a_0 、 b_0 拉伸后变为 a 、 b ，线应变为 $\Delta l/l_0$ ，若设材料性质与受力方向无关（这种材料我们称为各向同性材料），则

$$\mu = \frac{a_0 - a}{a_0} \frac{l_0}{\Delta l} = \frac{b_0 - b}{b_0} \frac{l_0}{\Delta l} \quad (1-4)$$

μ 称为泊松比。不可压缩材料 $\mu=1/2$ ，其他材料 $\mu < 1/2$ 。

4. 应变率 应变率是应变随时间的变化率，即单位时间内增加或减少的应变，它描述的是形变速率。其单位位为 s^{-1} 。

二、应 力

物体发生形变时，总是与力分不开的。由于组成物体的微观粒子之间的相对位置发生改变，物体内各个相邻宏观部分之间存在着相互作用且大小与外力相等的弹性力，此力使物体具有恢复原状的趋势。我们用单位面积上的弹性力作为恢复趋势的定量表示，称为应力 (stress)。它的单位是牛顿·米⁻² ($N \cdot m^{-2}$)。对应上述三种应变，有着以下三种形式的应力。

1. 张应力 在张应变的情况下，如图 1-2 所示，在物体内部的任意一横截面上会有张力存在。被这横截面所分开的两段物体将互相受到张力的作用。分布于此截面上的总力是和物体两端的拉力相等。横截面单位面积上的力叫做张应力，用符号 σ 表示：

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1-5a)$$

某一点的张应力，则应用求导数的方法，即

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{dF}{dS} \quad (1-5b)$$

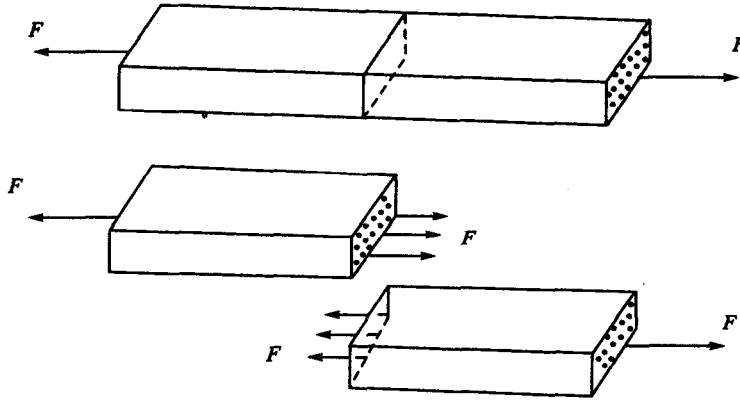


图 1-2 张应力

如果物体两端受到的不是拉力而是压力，物体的长度缩短，张应力此时为负值，也可称为压应力。

2. 体应力 当物体受到来自各个方面的均匀压力，且物体是各向同性时，可发生体积变化。此时物体内部各个方向的截面上都有同样大小的压应力，或者说具有同样的压强。因此体应力可用压强 P 表示。

3. 切应力 当发生切应变时，物体上下两个底面受到与底面平行但方向相反的作用。物体中的任一与底面平行的截面将把物体分成上下两部分，上部分对下部分有一与此外力大小相等方向相反的力的作用。它们都是与截面平行的剪切力。剪切力 F 与截面 S 之比，称为剪切应力，剪切应力也称切应力，以符号 τ 表示。有

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

某一点的切应力则为

$$\tau = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{dF}{dS} \quad (1-6b)$$

总之，应力就是作用在物体单位面积上的内力。与截面正交的力叫正应力，如张应力和压应力。与截面平行的应力称为切应力。应力反映物体发生形变时的内力情况。应变也叫胁变，应力也叫胁强。在复杂形变中，截面上各点的应力不一定相等，方向也可以和某一截面成一角度，因此可以同时受到切应力和正应力作用。

第二节 弹性模量

应力与应变之间存在着密切的函数关系，这种函数关系称为材料的本构关系，它是材料力学的重要内容。

一、弹性和塑性

在一定形变限度内，去掉外力后物体能够完全恢复原状的，这种物体称为完全弹性体，物体能够恢复变形的特性为弹性。若外力过大，外力除去后，有一部分变形将不能恢复，这种物体称为弹塑性体，外力除去后变形不能恢复的特性为塑性。对不同材料，应力与应变之间的函数关系不同，但有共同特征。图 1-3 表示一个典型的张应变和张应力之间的函数关系曲线。曲线上的 a 点叫做正比极限，不超过正比极限时，即在 oa 段，应力与应变成正比关系。b 点称为弹性极限，在 ab 段，应力与应变不再成正比关系，但在此范围内，外力除去后材料可以恢复原状，这种形变叫弹性形变。应变超范围时，外力除去后，材料则不能恢复原状，表现为永久变形。当应力达到 c 点时，材料断裂，把 c 点称为断裂点。断裂点的应力称为被试材料的抗张强度。压缩时，断裂点的应力称为抗压强度。图中 bc 是材料的范性（塑性）范围。若 c 点距 b 点较远，即 ϵ_c 与 ϵ_b 差值较大，则这种材料产生较大的范性形变，表示它具有展性。如果 c 点距 b 点较近，即 ϵ_c 与 ϵ_b 差值较小，则材料表现为脆性。

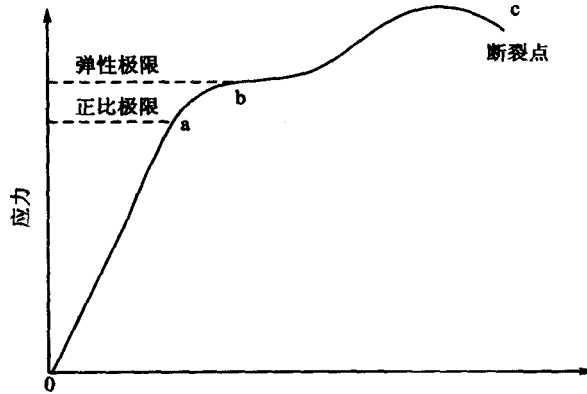


图 1-3 展性金属的应变-应力曲线

骨也是弹性材料，在正比极限范围之内，它的张应力和张应变成正比关系，图 1-4 表示湿润而致密的成人桡骨、腓骨和肱骨的应力-应变曲线，在应变小于 0.5% 的条件下，这三种四肢骨的应力-应变曲线皆为直线，呈正比关系。

图 1-5 为主动脉弹性组织的应力-应变曲线。曲线上没有直线部分，表明其并不服从虎克定律。弹性极限十分接近断裂点，说明它只要没有被拉断，在外力消失后都能恢复原状。由图可见，应变可达到 1.0，表示它可以伸长到原有长度的一倍。这一点和橡胶皮是类似的。

二、弹性模量

从应力应变曲线可以看出，在正比极限范围内，应力与应变成正比。这就是著名的虎克定律。对于不同的材料，可以有不同的比例系数，此比值称为该物质的弹性模量。弹性模量的单位为 $N \cdot m^{-2}$ 。

1. 杨氏模量 物体单纯受到张应力或压应力作用时，在正比极限范围内，张应力与张应变之比称为杨氏模量，用符号 E 表示，即

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/S}{\Delta l/l_0} = \frac{l_0 F}{S \Delta l} \quad (1-7)$$

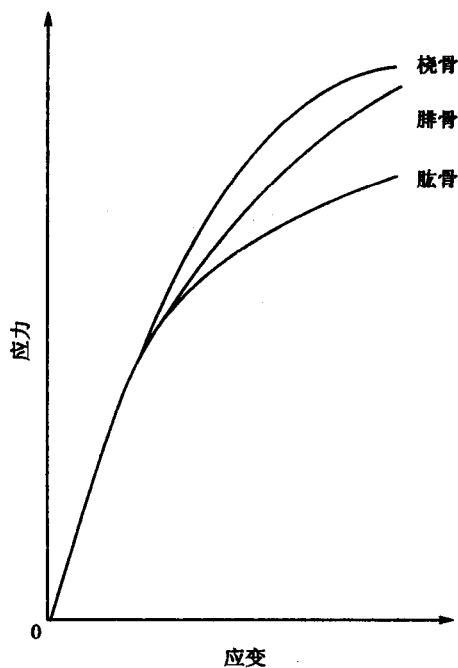


图 1-4 成人四肢骨应力-应变曲线

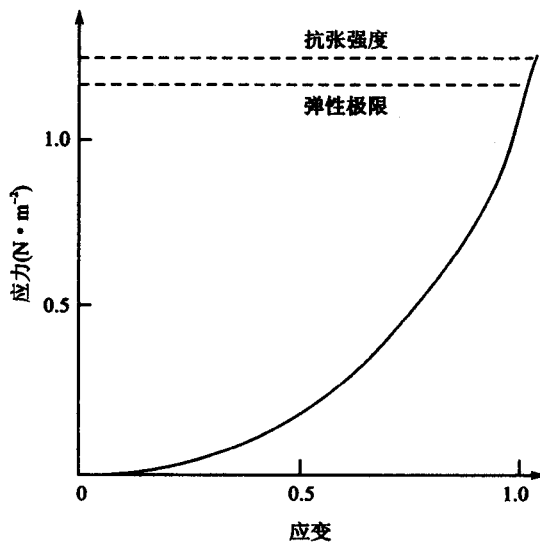


图 1-5 主动脉弹性组织的应力-应变曲线

一部分材料的杨氏模量见表 1-1。

表 1-1 一些常见材料的杨氏模量、弹性限度和强度

物 质	杨氏模量 $10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$	弹性限度 σ_0 $10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$	抗张强度 σ_t $10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$	抗压强度 σ_c $10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$
铝	70	18	20	—
骨拉伸	16	—	12	—
骨压缩	9	—	—	17
砖	20	—	—	4
铜	110	20	40	—
玻璃、熔石英	70	—	5	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
腱	0.02	—	—	—
橡胶	0.001	—	—	—
血管	0.0002	—	—	—

2. 体变模量 在体积形变中，压强与体应变的比值叫做体变模量，以符号 K 表示

$$K = \frac{-P}{\theta} = -\frac{p}{\Delta V/V_0} = -V_0 \frac{p}{\Delta V} \quad (1-8)$$

式中符号表示体积缩小时压强是增加的。体变模量的倒数，称为压缩率，记为 k ，物质的 k 值越大，越容易被压缩。

3. 切变模量 在切变情况下，切应力与切应变的比值称为切变模量，以符号 G 表示。

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{F/S}{\varphi} = \frac{Fd}{S\Delta x} \quad (1-9)$$

大多数金属材料的切变模量约为其杨氏模量的 $1/2 \sim 1/3$ 。切变模量也叫刚性模量。一部分材料的体变模量和切变模量见表 1-2。

表 1-2 一些常见材料的体变模量和剪切模量

物 质	体变模量 K	切变模量 G	物 质	体变模量 K	切变模量 G
	$10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$	$10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$		$10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$	$10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$
铝	70	25	木材	—	10
铜	120	40	骨	—	10
铁	80	50	水银	25	—
玻璃、熔石英	36	30	水	2.2	—
钢	158	80	乙醇	0.9	—
钨	—	140			

弹性模量表示物体变形的难易程度，弹性模量越大，物体越不容易变形。例如钢的杨氏模量为 $20 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ ，正如图 1-3 所表示的那样，当物体所受作用力较小时，应力与应变成正比，比例系数——弹性模量为常数。但当所受作用力较大时，应力与应变表现为非线性关系，其弹性模量与变形相关，不再为常量。一般称弹性模量与物体变形有关的物体为非线性弹性体，大多数材料均为非线性弹性体。

[例 1-1] 股骨是大腿中的主要骨骼。如果成年人股骨的最小截面积是 $6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ，问受压负荷为多大时将发生碎裂？又假定直至碎裂前，应力-应变关系还是线性，试求发生碎裂时的应变。（抗压强度 $\sigma_c = 17 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ ）

解：导致骨碎裂的作用力

$$F = \sigma_c \cdot S = 17 \times 10^7 \times 6 \times 10^{-4} \text{ N} = 1.02 \times 10^5 \text{ N}$$

这个力是很大的，约为 70kg 重的人体所受重力的 15 倍。但如果一个人从几米高处跳到坚硬的地面上，就很容易超过这个力。

根据骨的杨氏模量，可求碎裂时的应变

$$\epsilon = \frac{\sigma_c}{E} = \frac{17 \times 10^7}{0.9 \times 10^{10}} = 0.019 = 1.9\%$$

由此可见，在引起碎裂的负荷下，骨头的长度将减少 1.9%。

第三节 骨与肌肉的力学特性

骨骼与肌肉是机体的主要承载系统与做功单元，它们的力学性能对其功能的完成至关重要，骨骼与肌肉力学是目前生物力学学科的主要研究内容。