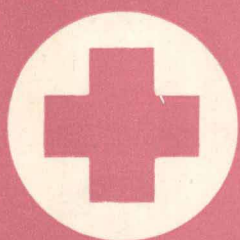


医用生物物理学

● 主 编 刘 骥 副主编 高佩琦



● 黑龙江科学技术出版社

医用生物物理学

主 编 刘 骥

副主编 高佩琦

编 者 (按姓名笔画顺序)

王大江 (佳木斯医学院)

刘袭君 (华西医科大学)

刘 骥 (哈尔滨医科大学)

张三才 (同济医科大学)

张均一 (白求恩医科大学)

吴几恺 (白求恩医科大学)

杨 光 (哈尔滨医科大学)

李松林 (哈尔滨医科大学)

沈霞昌 (山东医科大学)

梁国光 (西安医科大学)

高佩琦 (哈尔滨医科大学)

翟建才 (第三军医大学)

绘 图 王 龙 (哈尔滨医科大学)

黑龙江科学技术出版社

责任编辑：常虹

封面设计：张秉顺

医用生物物理学

主编 刘骥

副主编 高佩琦

黑龙江科学技术出版社出版

(哈尔滨市南岗区建设街35号)

黑龙江文化印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 17.5印张 390千字

1990年5月第1版 1990年5月第1次印刷

印数：1—4000册 定价：7.40元

ISBN 7-5388-1157-5/R·93

前 言

由于生物物理学本身的发展和它在医学中的应用日益广泛,卫生部1981年颁发的教学计划已把生物物理学列为医学各专业五年制本科学生的选修课。很多院校还把生物物理学列为七年制临床医学专业、五年制生物医学工程专业、基础医学专业和一些其他专业本科学生的必修课,各专业研究生的选修课和一些专业研究生的必修课。这些课程的教学时数相差较大,它们都急需一本适用的教材。本书主要是为了兼顾医学院校多方面的教学需要,作为各专业本科学生和研究生教材编写的。

生物物理学方法近年来已开始应用于日常医疗工作中,例如血液流变学和核磁共振成像等,近年来医学文献中也常常引用一些生物物理学的研究成果。早年毕业的医务工作者缺乏生物物理学的基本知识,在日常医疗工作中和阅读医学文献时都遇到一些困难。本书编写目的也是为了满足这方面的广泛要求,使之成为广大医务工作者和医学教师的自学参考书。

生物物理学是一门边缘科学,内容十分广泛。鉴于生物物理学的很多重要成果已纳入生物学、生理学、生物化学、组织学、微生物学、药理学和很多临床专业的教材和专著中,同时又考虑到医学生和医务工作者的数学和物理基础较薄弱,而且能够用来学习生物物理学的时间较少,本书在取材上尽量减少在其他学科的教材和专著中容易找到的内容,选取物理概念和方法较多,对于医学生和医务工作者较困难又较重要的题材,还尽量避免繁复的数学运算,采用比较直观的推理和解释方法。本书为了兼顾各方面的需要,全书既保持了一定程度的系统性,各章又保持了相对独立性,便于教师按照课程教学时数和学生情况,选取适当内容。医务工作者自学参考时,也可以根据需要,随时阅读适当章节。

本书是在哈尔滨医科大学1983年所编教材的基础上改编的,全书共分为两篇,各包括六章。第一篇介绍生物物理学基本知识,选取内容时一方面考虑到它的基础性,同时也注意到它与医学的联系性密切。本书与1983年版本比较,增加和加强了血液流变学、细胞生物物理、分子生物物理和自由基等内容,删去了目前连系实际的成果还不很丰富,医学生又较难学习的内容,如量子生物学和不可逆过程热力学等。第一篇中也适当介绍了一些生物物理技术,如血液流变学检测和生物大分子分离,提纯和鉴定等技术。后者虽然应用广泛,内容丰富,但由于在生化和仪器分析等教材和专著中都有详细论述,所以这里只作了简单介绍。本书第二篇介绍生物物理技术,主要是研究生物大分子结构、构象和功能的基本技术,同时也兼顾了这些技术在基础和临床各学科中的广泛应用。有些技术在医学各科中的应用是比较普遍的,例如荧光、激光、同位素等,其他技术则需要较高级的昂贵设备,激光拉曼谱仪和同位素穆斯堡尔谱仪等也是昂贵设备。我们介绍这些技术是由于它们在分子生物学中发挥着极重要的作用,在医学文献中经常出现应用这些技术的研究成果,对医学的发展具有重要意义。与1983年版本比较,第二篇主要是增加了荧光技术,删去了电子显微镜。前者是由于它应用的广泛性和重要性,后者当然是极重要的生物物理技术,删去它是由于另有专门课程和具有专著。此外,第二篇中还简单介绍了核磁共振成像原理。为了照顾生物医学工程专业的需要,本书在介绍各种技术原理及其主要应用时,对仪器设备也作了适当介绍。

本书选取这些题材的目的，一方面是为了减少医学生和医务工作者在日常工作、学习、科研和阅读医学文献中经常遇到的一些困难，而更重要的则是扩大他们的知识面和眼界，初步建立起运用物理学的概念、理论和技术解决医学和生理问题的观念，把生物物理学与医学更广泛深入地结合起来，为促进医学发展作出更大贡献。

本书由哈尔滨医科大学主持编写，华西医科大学、同济医科大学、湖南医科大学、西安医科大学、山东医科大学、白求恩医科大学、第三军医大学和佳木斯医学院等都积极支持了本书的编写和出版工作。本书第一章由吴几恺、张均一编写，第二章由张三才编写，第三章由沈霞昌编写，第四章由李松林编写，第五章由梁国光编写，第六章由王大江编写，绪论和第七章还有第三章和第五章的一部分内容由高佩琦编写，第八章和第十章由刘骥编写，第九章由杨光编写，第十一章由刘袭君编写，第十二章由翟建才编写。全书由刘骥和高佩琦审核修改，并且改写了少量内容。本书插图除第二、三、六、九、十一、十二等章由编者绘制外，其余各章都由王龙绘制。华西医科大学张书琴、胡新珉和湖南医科大学胡纪湘、程冠生等同志都非常关心本书的编写和出版工作，提出了很多宝贵意见，在此表示感谢。本书编者虽然都从事生物物理的教学和科研工作多年，但我们仍感到经验不足，水平更是有限，全书错误和缺点在所难免，希望读者批评指正。

编 者

目 录

绪 论	(1)
-----	-------

第一篇 生物物理基础

第一章 生物力学	(7)
----------	-------

§ 1—1 应力与应变	(7)
§ 1—2 高聚物的粘弹性	(9)
§ 1—3 骨骼的生物力学	(13)
§ 1—4 关节软骨的生物力学	(20)
§ 1—5 肌肉的力学性质	(24)

第二章 血液流变学	(28)
-----------	--------

§ 2—1 流变学基本概念	(28)
§ 2—2 血液的流变学性质	(29)
§ 2—3 影响血液粘度的因素	(32)
§ 2—4 血液的触变性	(35)
§ 2—5 粘度的测定方法和医学应用	(35)
§ 2—6 血管的力学性质	(38)
§ 2—7 血液在各种血管中的流动	(41)
§ 2—8 心脏力学	(43)

第三章 细胞生物物理	(48)
------------	--------

§ 3—1 细胞膜的结构	(48)
§ 3—2 细胞膜的流动性	(50)
§ 3—3 细胞膜的通透性	(55)
§ 3—4 细胞膜的电学性质	(61)
§ 3—5 人工双层脂膜	(65)
§ 3—6 细胞器的生物物理	(71)
§ 3—7 细胞的运动	(73)

第四章 分子生物物理	(76)
------------	--------

§ 4—1 生物大分子的一些物理测定方法	(76)
§ 4—2 生物大分子的高级结构	(82)
§ 4—3 维持生物大分子空间结构的作用力	(87)
§ 4—4 生物分子的激发态与能量转移	(94)

第五章 自由基 放射生物物理 (98)

§ 5—1 自由基的基本概念和性质	(98)
§ 5—2 体内自由基的生成	(99)
§ 5—3 体内自由基的清除	(102)
§ 5—4 自由基的检测	(103)
§ 5—5 自由基的生物学效应	(104)
§ 5—6 放射生物物理	(109)

第六章 生物控制论 (116)

§ 6—1 系统论的基本概念	(116)
§ 6—2 生物信息论	(117)
§ 6—3 生物控制论基本知识	(122)
§ 6—4 生物控制论的研究方法	(125)
§ 6—5 神经控制论	(131)
§ 6—6 生物反馈	(135)

第二篇 生物物理技术

第七章 荧光分光光度技术 (139)

§ 7—1 荧光产生与荧光光谱	(140)
§ 7—2 荧光参数	(143)
§ 7—3 荧光分子与荧光探针	(145)
§ 7—4 影响荧光强度的因素	(146)
§ 7—5 荧光分光光度计	(150)
§ 7—6 荧光分析方法	(156)
§ 7—7 荧光分析的生物学应用	(158)

第八章 旋光色散和圆二色性技术 (164)

§ 8—1 偏振光的基本知识	(164)
§ 8—2 旋光性和圆二色性	(166)
§ 8—3 旋光色散仪和圆二色仪	(171)
§ 8—4 生物大分子的光学活性及其应用	(174)
§ 8—5 磁致光学活性	(181)

第九章 激光技术及医学应用 (182)

§ 9—1 激光的基本原理	(182)
§ 9—2 激光对生物组织的作用及其临床应用	(189)
§ 9—3 激光在细胞学研究中的应用	(196)
§ 9—4 激光喇曼谱在分子生物学研究中的应用	(199)

§ 9—5 激光全息照相在生物医学中的应用	(201)
第十章 核磁共振和电子自旋共振技术	(207)
§ 10—1 磁共振的基本原理	(207)
§ 10—2 核磁共振波谱仪	(213)
§ 10—3 核磁共振谱线的化学位移和自旋分裂	(215)
§ 10—4 核磁共振技术在生物大分子研究中的应用	(219)
§ 10—5 核磁共振成像技术	(223)
§ 10—6 电子自旋共振	(226)
第十一章 X射线衍射技术	(235)
§ 11—1 晶体学基本知识	(235)
§ 11—2 X射线的衍射理论	(239)
§ 11—3 X射线衍射实验	(243)
§ 11—4 生物大分子的X射线衍射	(251)
第十二章 放射性同位素技术	(256)
§ 12—1 放射性基础知识	(256)
§ 12—2 放射性示踪分析	(258)
§ 12—3 放射免疫分析	(259)
§ 12—4 放射自显影术	(264)
§ 12—5 中子活化分析	(267)
§ 12—6 穆斯堡尔谱术	(268)
主要参考资料	(272)

绪 论

生物物理学是20世纪中叶以后逐渐形成,由物理学与生物学结合而产生的新兴交叉学科,是当代自然科学发展最迅速的部门之一。生物物理学是运用物理学的理论、技术和方法研究生命物质的物理性质和生命过程中的物理运动规律的科学。利用物理学和化学的成就来研究生命过程,不仅是可能的,而且是十分必要的。其所以可能,是由于物理学和化学在以往的年代里对简单系统的研究已经积累了十分丰富的经验、成熟的理论和先进的技术。生命过程既然以简单的过程作为它的基础,则这些成就在生物学领域中必将起到巨大作用。其所以必要,是为了真正揭露生命过程的奥秘,探求其实质,从而能更深入地掌握生命的基本规律,这样才有可能达到控制生物、改造生物的目的。从化学的角度来研究生命过程,即主要应用化学的方法了解机体的物质组成,化学反应机制及其与外界环境的关系的学科是生物化学。从物理学的角度来研究生命过程,即主要应用物理学的方法研究生物的基本结构和性能、物理过程和物化过程的本质,以及物理因素对机体的作用等的学科就是生物物理学。毫无疑问,这两门学科的联系是极为密切的。生物物理学的不断发展和完善,会引起一系列革命性变化,给科学技术带来新的突破。下面分三个方面对生物物理学做一个简单的介绍。

生物物理学的形成与发展

19世纪末叶,生理学家开始用物理概念如力学、流体力学、光学、电学及热力学的知识深入到生理学领域,这样就逐渐形成一个新的分支学科,许多人认为这就是最初的生物物理学。物理学渗透到生物学的历史,实际上还可以追溯到18世纪伽伐尼(Galvani)用静电刺激蛙肌肉的工作。他发现了肌肉收缩与电流之间的关系;通过Volta DuBols-Reymond的实验研究开拓了生物电这一领域。19世纪,迈耶(J.R.Mayer)从热、功和生理过程的关系研究,在1842年建立了能量守恒定律,且第一个指出光合作用主要是一个能量转化过程;亥姆霍兹(H.L.Von Helmholtz)被誉为生物物理的奠基者,对视觉和听觉研究有杰出贡献。历史上另一个事例是J.Tyndall,作为一个在法拉第手下工作的物理学家,他对生物学所作出的贡献是值得一提的,他对微生物学作出的贡献可以与同时代的路易·巴斯德齐名。近代,量子力学主要创始人薛定谔(ErWin Schrodinger)在推动生物物理学的发展中起了重要作用。1943年2月,他在爱尔兰都柏林三一学院作了几次演讲,演讲的内容归纳成有名的文章“生命是什么?”,文章中提出了“负熵”来说明机体的有序性,认为遗传的物质基础是有机分子,生物体系中存在着量子跃迁现象等,为发展近代分子生物学和量子生物学做出卓越功绩。如果说在牛顿力学和经典电磁学时期,人们只能研究血管内血液流动的规律和兴奋、传导的基本规律等一些问题;那么在本世纪50年代以后,由于物理学的重要突破及相应技术的飞速发展,即量子力学和多种光谱与波谱技术的出现,为各种生物学问题的研究提供了巨大的可能性。其中最突出的是X射线衍射结构分析对核酸和蛋白质的空间结构的测定,加上圆二色、核磁共振和电子自旋共振、核素示踪及电镜等技术的协助,对生物大分子的物理性质和结构功能关系的研究可在分子水平进行,带动了整个生物学和医学的许多分支学科进入分子领域,成为20世纪最激动人心的进展之一。

国际纯粹与应用生物物理联合会(简称IUPAB)在1961年建立。目前会员国已有40

多个,我国在1985年参加。从国际生物物理学会成立到现在,不过只有近30年的历史,但生物物理学作为一门独立学科的发展是十分迅速的。英、美、苏、日等许多国家在高等学校中设有生物物理专业,有的设在物理系内,有的设在生物系内,也有的设在工程技术类的院校。目前各工业先进国家均投入很大的力量致力于这门科学的研究工作。我国开展生物物理科研与教学工作的历史更短些,但发展也很快。目前从事本专业工作的单位有几十个,其中医学院校占3/3以上。尽管许多方面还与当前国外的进展有较大距离,但是由于受到国家和科学工作者的重视,我们将会迅速地赶上去。

生物物理学的主要内容

生物物理学研究的内容十分广泛,一般常分为量子生物物理,分子生物物理,细胞生物物理和复杂体系的生物物理等几部分;而其所涉及的问题则几乎包括了生物学的所有基本问题。由于生物物理学是一门正在成长着的边缘学科,它的具体内容和发展方向正在不断变化中,它和一些关系特别密切的学科(例如生化、生理等)的界限不是很明确的。我们在这里只对生物物理学的主要内容做些简要介绍。

1.生理生物物理 它包括的内容有肌肉收缩、神经传导、感觉(视、听、嗅、味、触)等一些经典生理学的研究课题。由于生物物理学的发展,这类问题不仅已从分子水平上深入甚至定量地加以探讨,而且从系统控制的水平进行研究,以期揭示这些过程的物理本质。这是生物物理最早发展,但仍很活跃的一个领域,特别应该提出的是目前“神经生物物理”受到极大重视,因为这是揭开人类认识、学习、记忆以至创造性活动的基础。

2.分子生物物理 主要研究生物分子的结构,构象与动力学,分子间的相互作用,分子本身的能量状态以及能量转移,分子聚集态的形成,结构与功能,也包括水在生命体系中的作用等课题。生物分子(特别是核酸和蛋白质)的结构与功能是这一领域中的核心问题。50年代以后发展起来的X射线衍射技术,能对分子结构进行精确测定,为分子生物学的产生和发展作出了奠基性的贡献。虽然它目前仍是主要技术手段且向高分辨和对复合物的研究发展,但晶态毕竟不是活体的真实状态;因此60年代开始应用圆二色、核磁共振和荧光等多种技术开展溶液中构象的研究;70年代开始对分子动力学的研究,技术上主要依靠二维核磁和时间分辨的荧光(或磷光)的帮助,理论上则应用势能函数和最小能量原理等通过计算机帮助研究,分子构象随时间变化的动力学,分子间的特异相互作用,生物水的确切作用等是分子生物物理今后的重要课题。

3.膜与细胞生物物理 主要研究膜的结构与功能,细胞各种活动的分子机理。膜的动态认识,膜中脂类的作用,通道的结构及其启闭过程,受体结构及其与配体的特异作用,信息传递机制,电子传递链的组分结构及其运动以及能量转换的机制都是膜生物物理的重要课题。细胞生物物理目前研究的深度还不够,随着分子与膜生物物理的进展,细胞的各种活动的分子机理也必将逐步阐明。

4.量子生物物理 这是分子生物物理深入一个层次的自然发展,它应用量子力学的计算方法研究大小分子的结构与功能。目前已从药物、毒物等简单分子逐步向复杂体系过渡,试图从电子水平说明生命现象的本质,涉及各种生命活动的基础。但在方法上还必须不断发展以适应需要。

5.生物力学与流变学 研究生物对象(骨骼、肌肉、组织、血液等)的力学性质,特别是流动与变形性质,其中血液流变学由于在医学中的应用极为重要,因而最受重视。目前它不仅从传统的宏观角度,而且也深入到了微观水平,涉及到内部微观结构及其物理与化学行

为。已形成一个独立分支。

6. 辐射生物物理 研究各种波长电磁波（包括电离辐射）对机体和生物分子的作用机理及其产生效应的利用与防护基础的研究。目前比较重要的包括光生物物理和电离辐射的生物物理两部分。能量的吸收、传递、转换及其产生的电离、激发作用；自由基，活性氧以及剂量与防护等问题是其主要内容，随着科学技术的发展，激光、同步辐射等一些具有独特性质的辐射也受到重视。

7. 生物控制论与信息论 主要用控制论的理论与方法研究生物系统中加工、处理，从而实现调节控制机理。它从综合的、整体的角度出发研究不同水平的生物系统各部分之间的相互作用，或整个系统与环境之间的相互作用，神经控制论和生物控制系统的分析和模拟是其两个重点。

8. 生物物理仪器与技术 每一项重要技术的出现常常使生物物理的研究进到一个新的水平，推动学科迅速发展。X射线衍射分析、核磁共振技术及常规波谱分析都是很典型的例子。生物物理技术和仪器还有一个重要的任务是根据研究课题的需要设计新的仪器，如为了研究细胞膜上脂分子和蛋白分子的侧向扩散运动而设计的荧光漂白恢复技术（FPR）等。

生命科学各个领域的研究中，几乎都需要生物物理学的参与；与此同时，生物物理学本身也在不断充实新内容，并且不断得到发展，开拓新领域。

生物物理学与医学的关系

医学着重研究人在正常与疾病条件下的各种规律，属于生命科学范畴。在科学技术不发达的时代，人们只能从现象上定性地了解什么是正常，什么是疾病，而且主要依靠实践经验的积累来解决疾病的诊断、治疗与预防问题。近代生物学的发展，特别是生物化学与生物物理学的应用，必将更深入地触及现象本质，疾病发生的机制问题，从而在寻找消灭和预防疾病的途径中起到重要作用，这也是科学发展的必然结果。下面从三个方面加以说明。

1. 基础医学问题的研究 因为对许多疾病的产生机理不清楚，所以很难做出正确的诊断和采取有效的治疗措施，肿瘤就是一个突出的例子。近年来，生物物理学已在这一问题上做了不少工作。已经了解，细胞及其质膜在癌变过程中表现出明显的变化，如表面电荷改变，细胞膜流动性增大，细胞内水的状态的改变等。在研究这些问题时，广泛应用了荧光分光技术，核磁共振及细胞电泳等技术。由于对核酸和蛋白质等大分子的晶体结构以及溶液构象的研究，可以了解蛋白质变性，酶的催化作用及核酸构象变化和突变产生的机制等细节。从射线产生自由基以及其具有顺磁性及近年来对活性氧的研究得到许多病理过程，包括辐射损伤、衰老、毒物作用，心血管疾病中的一些环节等都和自由基有关的新观点，所谓自由基病理学就是在这基础上发展起来的。由于量子生物学的发展，对一些简单分子，特别是致癌化合物的电子结构的研究，也对阐明某些物质为什么具有致癌活性的规律提供了证据，为某些药物的疗效和结构的关系提供了说明，这就有可能为提高药效开辟途径。这样的例子还可以举出很多。

2. 临床实践中的应用 基础学科的发展必然会在实践中得到反映。生物物理学在对疾病的诊断、治疗和预防方面都日益显示了作用。对血液粘度的测量在诊断红细胞增多症、慢性白血病、急性心肌梗塞与冠状动脉栓塞症、糖尿病等，都有明显的价值。1973年后开始出现的核磁共振成像，其特点是能够区分软组织，且基本上对人体无损伤，在许多方面优于X射线断层成像（X-CT），已在诊断脑内及其他内脏疾病方面得到应用。血卟啉的抗癌作用受到重视，主要利用其作为光能的吸收者，在光照和有氧条件下起能量传递作用而达到治疗目的，

被称为光敏化氧化作用或光动力学作用。这种作用和光波波长、氧压大小以及能量的最终受体有关。在治疗方面引人注意的另一个问题是利用人工膜载带药物并定向导引到疾病部位，达到治疗的目的。用来携带药物的人工膜由类脂组成，称为脂质体，它由脂类在水相中振荡而成。如果事先在水相中溶有药物或酶，则在所形成的脂质体中即含有这类药物。输入机体后，可通过各种途径到达病变部位。目前除用脂质体载药外，还用其载酶或载带基因，俗称人体导弹。载酶，可克服电脑屏障，治疗由于缺乏某种酶而引起的神经节苷脂贮积症；载入基因，可用于对细胞的改造。可以预期，这类应用将会愈来愈多。

3. 在未来医学发展中的作用 医学科学的现代化还刚刚开始，未来的下一世纪医学一定会得到更大的发展。在下一世纪我们将面临严重的环境污染，“不治之症”对人类的折磨，人口的爆炸性增长等问题。要解决这些问题，除利用现有的科技手段之外，还必须寻找新的手段，这就是向生命本身学习。实际上，有机体特别是人体本身具备了各种极其精巧的、高效率的功能，包括物质与能量的转换，信息的处理，它比起现有科学技术所能达到的程度远为完善和可靠，如果能够把生物对象自己所具备的各种功能彻底搞清楚，那么就能充分加以利用，用人工的办法加以实现，而为了这一目的，研究生命的基本过程就成为关键的步骤。在这一过程中，生物物理学将越来越多地发挥作用，且将越来越被所有生命科学领域中的科学工作者所重视，以便共同协作，为未来医学发展作出贡献。

从以上几个方面可以看出，生物物理学和医学无论在机理、诊断与治疗方面都有很密切的关系。从国际与国内的趋势来看，在生物物理学的实际应用方面，医学是一个最受人重视的部门。近代医学的发展，越来越多地依赖生物物理学的发展，近代诊断与治疗的先进技术的应用，也迫切要求医务工作者具备更多的生物物理知识，掌握更多的生物物理技术。

第 一 篇

生 物 物 理 基 础

第一章 生物力学

生物力学是许多学科互相渗透的一门新兴的学科,是在解剖学、生理学、力学、物理学等许多学科的基础上发展起来的。它的理论基础是数学和力学,涉及面广、内容庞杂。本章所要讨论的仅是生物固体材料的力学性质——生物固体力学。生物力学将帮助我们更深刻、更准确地认识生命过程,帮助我们解决医学工程和临床医学中的问题,如骨的力学性质的研究,对深入理解骨的结构和功能具有重大意义;能使我们了解骨在机体中能承受的最大载荷,以及年龄、疾病等因素对骨的力学性能的影响,为临床骨折愈合机理的分析和人工骨的研究提供生理数据。

本章在讨论骨骼、软骨及肌肉等生物材料的力学性质前,将对应力、应变和生物材料的粘弹性等基本概念作简单介绍。

§ 1—1 应力与应变

外 力

作用在物体上的外力,按其作用方式,可以分成体积力和表面力,简称体力和面力。体力是指直接作用于物体内每个质点上的力,如物体的重力和惯性力等,单位是牛顿每立方米(N/m^3)。面力是指仅作用于物体表面上的力,它又可分为分布力和集中力。连续分布于物体表面某一面积上的力称为分布力,单位是牛顿每平方米(N/m^2)。有些分布力的强弱程度是沿着物体的轴线起作用的,单位是牛顿每米(N/m)。当外力仅作用于物体表面的某一点上时,称为集中力,单位是牛顿。

内 力

当物体受外力作用而发生变形时,在物体的任一部分与另一部分之间会产生相互作用力,称为内力。对于弹性体来说,任一截面上的内力强度是逐点变化的,为了研究物体内某一点处的内力,可用一个假想的平面,如图1—1中的m—n平面,将物体分成两部分,然后任取其一部分,由平衡原理求出其内力,如图1—1中的内力F和内力矩M。这种方法称为截面法。

应 力

内力是连续分布于截面上的,用截面法所求得的只是截面上内力的合力。而且,截面上的内力一般不一定是均匀分布的。为了更准确地反映截面上各点处的内力分布情况,我们引入内力集度的概念。设在图1—2(a)所示的受力物体的m—m截面上,围绕A点取一小面积 ΔA , ΔP 为作用在 ΔA 上的分布内力的合力,那么,在 ΔA 上内力的平均集度($P_{\text{A}} = \frac{\Delta P}{\Delta A}$)称为 ΔA 上的平均应力。当 ΔA 趋近于零时,平均集度的极限值为

$$P = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA} \quad (1-1)$$

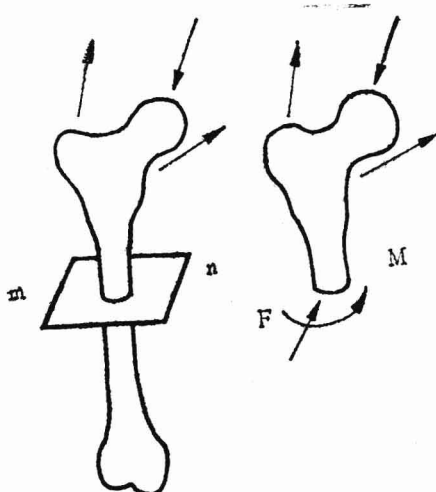


图1—1 截面法求内力

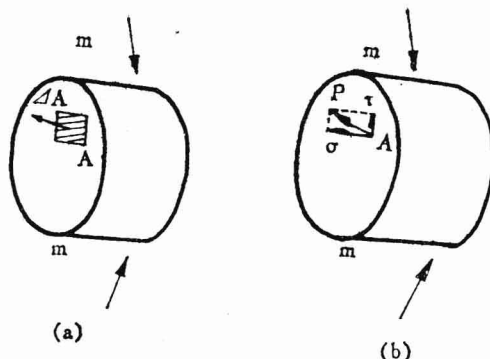


图1—2 应力

即为A点处的内力集度，称为A点处的应力。应力的常用单位是兆牛每平方米(MN/m^2)。应力是一个矢量，由于外力的作用方向往往是任意的，所以应力P一般与截面是斜交的。通常把应力P分解成垂直于截面的法向分量 σ 和平行于截面的切向分量 τ ，如图1—2(b)。 σ 称为正应力， τ 称为剪应力（或切应力）。

应变

物体在外力作用下发生的形变可以归结为长度的改变和角度的改变两种，现分别讨论如下：

1. 线应变 如图1—3所示，设有一柱形物体，长度为 l ，左端固定，在右端的自由端上

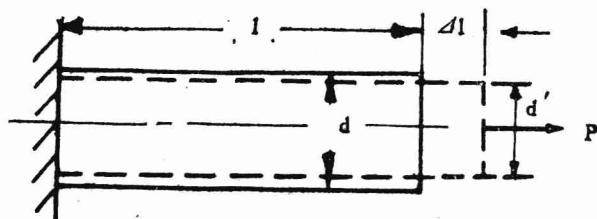


图1—3 线应变

作用一个轴向拉力P，则柱形体在P的作用下长度改变为 $l + \Delta l$ ，其相对变形（用符号 ϵ 表示）为

$$\epsilon = \frac{(l + \Delta l) - l}{l} = \frac{\Delta l}{l} \quad (1-2)$$

相对变形常称为线应变或正应变。线应变仅表明物体在外力作用下长度的改变，伸长或者缩短，线应变是物体在正应力作用下的应变。

(1) 当 Δl 为(+)时，则 ϵ 为(+)，表示物体在外力作用下伸长了，这时的线应变叫拉应变，表示物体在拉应力作用下的应变。

(2) 当 Δl 为(-)时，则 ϵ 为(-)，这时物体的长度在外力作用下缩短了，表示物体是在压应力作用下的应变，所以亦叫压应变。

还应当注意，当轴向伸长时 (Δl 为 (+))，横向必定缩短 ($\Delta d = d' - d$ 为 (-))，反之，当轴向缩短时，横向伸长，即 Δl 为 (-)， Δd 为 (+)。比值 $|\Delta d / \Delta l|$ 称为泊松比，理论证明，一切材料的泊松比都小于 0.5。

2. 剪应变 在剪应力作用下，物体原为正方形，现变成了菱形，产生了形状的改变，如图 1—4 上的虚线所示。这种在剪应力 τ 作用下产生的形变，称为剪应变 (或切应变)，用 γ 表示。 γ 定义为发生剪应变时，原为直角角度变化的正切值，即 $\gamma = \tan \varphi = \Delta x / l$ ，因为 φ 很小，所以 $\gamma \approx \varphi \approx \Delta x / l$ ，因此，剪应变是物体在剪应力作用下，原来互相垂直的两条棱边所张角度的改变。其度量单位是弧度。

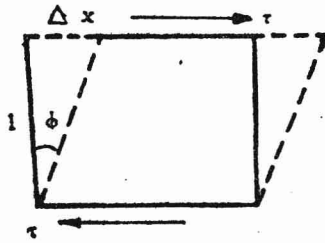


图 1—4

剪应力作用下的剪应变

§ 1—2 高聚物的粘弹性

在生物材料中，数量很大的是多糖和蛋白质等生物大分子，这种许多生物大分子聚集在一起的聚合物称为高分子聚合物，简称高聚物。橡胶、塑料等物质也都是高聚物。

高聚物有多种不同的结构，即许多高分子聚集在一起可有多种不同的聚合态，大致可分三类：①分子不交联的无定形聚合态，结构如图 1—5 (a)。其分子可互相分开，分子间可互相滑动，材料可拉长或无规则地扭变，但不能回复到原来的形状，所以是非弹性的，体液具有这种聚合态的性质。②分子交联的无定形聚合态，结构如图 1—5 (b)。分子间因交联不能互相滑动，材料拉长时，长分子可在拉长方向伸直，拉长到原来的三倍；当被放松时，又能卷紧和弹开，分子又能回复到原来的尺寸。如弹性蛋白具有这种聚合态类似的性质。③纤维类无定形聚合态，结构如图 1—5 (c)。此类材料具有较高的弹性模量 ($1-10 \text{ MN/m}^2$)，如胶原纤维等。

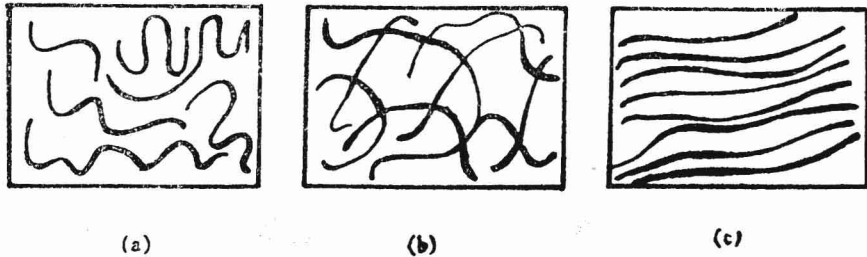


图 1—5 高聚物的三种聚合态

- (a) 分子不交联的无定形聚合态
- (b) 分子交联的无定形聚合态
- (c) 纤维类无定形聚合态

所有组成人体组织器官的生物材料都是由上述三种聚合物和其他掺合物 (无机盐、水、空气等) 构成的复杂结构，具有特殊的力学性质，这与大分子链的长度和构型 (线型或网