

高等医药院校教材

供基础、预防、临床、生物医学工程专业用

# 医用生物物理学

刘 骥  
高佩琦 主编  
施永德

人 民 卫 生 出 版 社

高等医药院校教材  
供基础、预防、临床、生物医学工程专业用

# 医用生物物理学

主 编 刘骥 高佩琦 施永德  
副主编 谭润初 翟建才

编委 刘 骥 (哈尔滨医科大学)  
高佩琦 (哈尔滨医科大学)  
施永德 (上海医科大学)  
谭润初 (中山医科大学)  
翟建才 (第三军医大学)  
程冠生 (湖南医科大学)  
陈丽娜 (哈尔滨医科大学)  
许 艳 (哈尔滨医科大学)  
董 维 (西安医科大学)  
董 巍 (中国医科大学)  
尹 勇 (中国医科大学)  
还连进 (上海医科大学)  
绘图 朱 翔 (哈尔滨医科大学)

人 民 卫 生 出 版 社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

医用生物物理学/刘骥等主编. —北京:人民卫生出版社, 1998

ISBN 7-117-03149-2

I. 医… II. 刘… III 人体-生物物理学 IV. Q6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 30783 号

## 医用生物物理学

主 编: 刘 骥 高佩琦 施承德

出版发行: 人民卫生出版社(中继线 67616688)

地 址: (100078)北京市丰台区方庄芳群园 3 区 3 号楼

网 址: [http //www pmph com](http://www.pmph.com)

E - mail: [pmph @ pmph com](mailto:pmph@pmph.com)

印 刷: 北京人卫印刷厂

经 销: 新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 18 5

字 数: 433 千字

版 次: 1998 年 12 月第 1 版 2000 年 4 月第 1 版第 2 次印刷

印 数: 4 071—9 070

标准书号: ISBN 7-117-03149 2/R·3150

定 价: 20.50 元

著作权所有, 请勿擅自用本书制作各类出版物, 违者必究

(凡属质量问题请与本社发行部联系退换)

## 前 言

由于生物物理学本身的迅速发展及其与医学的密切关系,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、五年制临床医学专业、生物医学工程专业、基础医学专业和一些其它专业本科学生的必修课,各专业研究生的选修课或必修课。这些课程的教学时数相差较大,急需一本通用的教材。为此,人民卫生出版社已把生物物理学列入“九五”期间各类配套教材出版计划中,本书就是根据这个出版计划,为了适应医学院校多方面的教学需要而编写的。

生物物理学方法近年来已开始应用于日常医疗工作中,例如血液流变学及磁共振成像等;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会遇到一些困难。本书也兼顾了这方面的广泛要求,还可以作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,或已经生疏,而且能够用来学习生物物理学的时间又较少,本书取材尽量减少与其他学科的教材和专著交叉的内容,选取物理概念和方法较多、对医学生和医务工作者较困难又较重要的题材;还尽量避免繁琐的数学公式和运算,采用比较直观的推理和解释方法。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 1990 年,哈尔滨医科大学等八校联合编写“医用生物物理学”的基础上改编的。这次改编全书仍分为两篇,但为了反映生物物理学的发展及适应更广泛的需要,增加了 3 章,共计 15 章。第一篇介绍生物物理学基本知识,选取内容时考虑到它的基础性,同时也注意到它与医学的密切联系。在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较详细论述,所以这里只做了简单介绍。本书第二篇介绍生物物理技术,这些技术较为复杂,在基础和临床各学科中都有广泛应用,尤其是在分子生物学中发挥着极其重要的作用,在医学文献中经常出现应用这些技术的研究成果,对医学发展具有重要意义。

生物物理学是一门迅速发展的科学,本书在这次改编时尽量纳入本学科一些最新成就。但由于篇幅的限制,很多有重要意义的成果都不能不割舍了。

本书由哈尔滨医科大学主持编写,上海医科大学、中山医科大学、第三军医大学、湖南医科大学、中国医科大学和西安医科大学都积极支持和参加了编写工作。本书第一、五章由施永德(上海医大)编写;第二章由谭润初(中山医大)编写;第三章由董巍(中国医大)编写;第四、十五章由程冠生(湖南医大)编写;第六章由董维(西安医大)编

写；第七章由翟建才（三军医大）编写；第八章由还连进（上海医大）编写；第九章和绪论由高佩琦（哈医大）编写；第十章由高佩琦、许艳（哈医大）编写；第十一章由刘骥（哈医大）编写；第十二章由陈丽娜（哈医大）编写；第十三章由尹勇（中国医大）编写；第十四章由刘骥、许艳（哈医大）编写。全书由刘骥和高佩琦审核修改，并且改写了部分内容。本书插图除第六、七及三、十三等章部分图由编者绘制外，其余各章都由朱翔（哈医大）绘制。哈医大的乔觉民、马波和马小翠也为本书的出版做了很多工作，在此表示感谢。

本书编者虽然都从事生物物理学的教学和科研工作多年，但我们仍感到经验不足，水平更为有限，全书错误和缺点在所难免，希望读者批评指正。

编 者

1997年6月

# 目 录

绪 论	(1)
<b>第一篇 生物物理基础</b>	
第一章 生物力学	(5)
第一节 应力、应变、本构方程基础知识	(5)
第二节 粘弹性	(8)
第三节 骨骼的生物力学	(10)
第四节 关节和软骨的生物力学	(15)
第五节 肌肉力学	(19)
第六节 心脏和血管力学	(23)
思考题	(25)
第二章 血液流变学	(26)
第一节 血液的流变学性质	(26)
第二节 影响血液粘度的因素	(29)
第三节 红细胞的变形性和聚集性	(31)
第四节 血液的流动	(34)
第五节 血液流变学参数测定和医学应用	(37)
思考题	(40)
第三章 生物电学	(41)
第一节 心电原理	(42)
第二节 脑电原理	(52)
第三节 肌电原理	(56)
思考题	(59)
第四章 膜与细胞生物物理	(60)
第一节 细胞膜的成分	(60)
第二节 细胞膜结构模型	(62)
第三节 细胞膜分子的运动	(63)
第四节 细胞膜的通透性	(66)
第五节 细胞膜的电学性质	(69)
第六节 人工脂膜	(73)
第七节 细胞的运动	(78)
思考题	(80)
第五章 分子生物物理学	(81)
第一节 生物大分子的基本知识	(81)

第二节	生物大分子的内、外环境及作用力 .....	(86)
第三节	蛋白质的空间结构 .....	(95)
第四节	核酸和染色体的空间结构 .....	(108)
思考题	.....	(112)
第六章	自由基、放射生物物理 .....	(113)
第一节	自由基的概念、性质及检测 .....	(113)
第二节	体内自由基的生成和清除 .....	(115)
第三节	自由基的生物学效应 .....	(119)
第四节	电离辐射的生物物理研究 .....	(125)
思考题	.....	(129)
第七章	感官与神经生物物理学 .....	(130)
第一节	神经信号的产生和传递 .....	(130)
第二节	视觉感受器的信息转递 .....	(137)
第三节	听觉感受器的信息转递 .....	(145)
第四节	嗅觉感受器的信息转递 .....	(149)
思考题	.....	(151)
第八章	生物控制论 .....	(152)
第一节	引言 .....	(152)
第二节	信息、系统和控制 .....	(153)
第三节	系统的描述 .....	(157)
第四节	系统分析 .....	(158)
第五节	系统辨识 .....	(159)
第六节	系统控制 .....	(160)
第七节	一些生物系统控制问题 .....	(162)
思考题	.....	(166)

## 第二篇 生物物理技术

第九章	电子显微技术 .....	(167)
第一节	透射电子显微镜的构造原理 .....	(167)
第二节	扫描电子显微镜的构造原理 .....	(170)
第三节	分析电子显微镜的原理和方法 .....	(173)
第四节	电子显微镜的样品制备技术 .....	(175)
第五节	电子显微技术的新发展 .....	(178)
第六节	电子显微镜在生物医学中的应用 .....	(180)
思考题	.....	(182)
第十章	荧光分光光度技术 .....	(183)
第一节	荧光产生与荧光光谱 .....	(184)
第二节	荧光分子与荧光参数 .....	(187)
第三节	影响荧光强度的因素 .....	(190)

第四节	荧光分光光度计及荧光分析法	(193)
第五节	荧光分析的生物学应用	(199)
思考题		(203)
<b>第十一章</b>	<b>旋光色散和圆二色性技术</b>	<b>(204)</b>
第一节	偏振光的基本知识	(204)
第二节	旋光性和圆二色性	(206)
第三节	旋光色散仪和圆二色仪	(211)
第四节	生物大分子的光学活性及其应用	(213)
思考题		(217)
<b>第十二章</b>	<b>激光技术及其医学应用</b>	<b>(218)</b>
第一节	激光的基本原理	(218)
第二节	激光全息照相术	(225)
第三节	激光对生物组织的作用及临床应用	(229)
第四节	激光在细胞学研究中的应用	(233)
第五节	激光在分子生物学研究中的应用	(236)
思考题		(237)
<b>第十三章</b>	<b>核磁共振和顺磁共振技术</b>	<b>(238)</b>
第一节	核磁共振的基本原理	(238)
第二节	核磁共振波谱仪	(243)
第三节	核磁共振谱线的化学位移和自旋分裂	(245)
第四节	核磁共振技术及其应用	(246)
第五节	核磁共振成像技术	(249)
第六节	顺磁共振原理及应用	(251)
思考题		(256)
<b>第十四章</b>	<b>X射线衍射技术</b>	<b>(257)</b>
第一节	晶体学基本知识	(257)
第二节	X射线衍射理论	(262)
第三节	X射线衍射实验	(265)
第四节	生物大分子的X线衍射	(269)
思考题		(272)
<b>第十五章</b>	<b>放射性核素技术</b>	<b>(273)</b>
第一节	放射性核素的基础知识	(273)
第二节	放射性核素示踪技术	(276)
第三节	放射自显影技术	(281)
第四节	放射免疫分析	(284)
第五节	受体的放射性配体结合分析	(287)
思考题		(289)
<b>主要参考资料</b>		<b>(290)</b>



## 绪 论

生物物理学是 20 世纪中叶以后逐渐形成,由物理学与生物学相结合而产生的新兴边缘学科,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、生命过程的物理和物理化学规律,以及物理因素对生物系统作用机制的科学。学科交叉是当前极富活力的领域,科学的协同作用及相互激励作用逐渐被人们所认识,生命科学与物理学的交叉更日益受到人们的关注。这是由于物理学在以往的年代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。另外,为了真正揭示生命过程的本质,深入掌握生命过程的基本规律,从而达到控制生物、改造生物的目的,没有物理学的理论和技术也是不可能的。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。生物物理学的不断发展和完善,一定会促进生命科学的发展,并可能带来新的突破。下面分三个方面对生物物理学作一个简单介绍。

### 一、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。实际上物理学与生物学的结合很早以前就已经开始。例如克尔肖(Kircher)在 17 世纪描述过生物发光的现象;波莱利(Borrelli)在其所著《动物的运动》一书中利用力学原理分析了血液循环和鸟的飞行问题。18 世纪伽伐尼(Galvani)通过青蛙神经由于接触两种金属引起肌肉收缩,从而发现了生物电现象。19 世纪,梅耶(Mayer)通过热、功和生理过程关系的研究建立了能量守恒定律。特别是本世纪 40 年代初,著名的量子物理学家薛定谔(Schrödinger)专门作了“生命是什么”的报告中提出的几个观点,如负熵与生命现象的有序性、遗传物质的分子基础,生命现象与量子论的协调性等,以后陆续都被证明是极有预见性的观点,而且均得到证实。这有力地说明了近代物理学在推动生命科学发展中的作用。

近代生物物理学的形成与发展始于本世纪 50 年代,物理学在各方面取得重大成就之后,X 射线衍射晶体分析对核酸与蛋白质的空间结构的研究开创了分子生物学的新纪元,将生命科学的许多分支都推进到分子水平,同时也把这些成就逐步扩大到细胞、组织、器官等,成为微观生物物理学发展的一条主干。除此以外,应用生物信息论与控制论、非平衡态热力学、非线性与复杂性等的研究从宏观角度对生命现象进行了探讨,成为宏观生物物理学发展的基础。这两方面的结合使生物物理学以崭新的面貌出现在自然科学,特别是生命科学的行列之中,成为一门需要较多数学与物理基础,研究生命问题的独立发展的边缘学科。

国际纯粹与应用生物物理学联合会(简称 IUPAB)于 1961 年建立,以后每 3 年召开 1 次大会,至今已成为包括 40 余个国家和地区的生物物理学会,我国已于 1982 年参加了这个组织。从国际生物物理学会成立到现在,虽然只有 30 多年的历史,但生物物理学作为一门独立学科的发展是十分迅速的。美、英、俄、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。目前发达国家均投入很大的力量致力于这门学科的研究工作。我国开展生物物理科研与教学工作的历史更短些,但发展较快。目前从事本专业工作的单位有几十个,其中医学院校占 1/3 以上。尽管许多方面与国外的进展有较大差距,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。

## 二、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;涉及的问题则几乎包括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,其具体内容和发展方向也在不断变化和完善,它和一些关系特别密切的学科(生化、生理等)的界限也不是很明确。这里只对生物物理的主要内容做些简要介绍。

1. 分子生物物理 分子生物物理是本学科中最基本、最重要的一个分支。它运用物理学的基本理论与技术研究生物大分子、小分子及分子聚集体的结构、动力学,相互作用和其生物学性质在功能过程中的变化,目的在于从分子水平阐述生命的基本过程,进而通过修饰、重建和改造生物分子,为实践服务。

生物大分子及其复合物的空间结构与功能的关系是分子生物物理的核心问题。自从 50 年代 X 射线衍射晶体分析法应用于核酸与蛋白质获得成功,奠定了分子生物学发展的基础,至今已有 40 余年历史。在这段时期中,有关结构的研究大体上经历了 3 个主要阶段:①晶体结构的研究;②溶液中生物分子构象的研究;③分子动力学的研究。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。

2. 膜与细胞生物物理 膜及细胞生物物理是仅次于分子生物物理的一个重要部分。主要研究膜的结构与功能,细胞各种活动的分子机制;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与能量转换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,细胞各种活动的分子机制也必将逐步阐明。

3. 感官与神经生物物理 生命进化的漫长历程中出现了能对内、外环境作出反应的神经系统。神经系统连同有关的感觉器官在高等动物特别是在人体内已发展到了高度复杂的程度,其结构上的标志是出现了大脑皮层,功能上大脑是最有效的信息处理、存贮和决策机构。因此感官和脑的问题已经成为神经生物学注意的中心。研究的主要问题有:①离子通道;②感受器生物物理;③神经递质及其受体;④神经通路和神经回路研究;⑤行为神经科学。这是生物物理最早发展,但仍很活跃的一个领域,特别应该指出的是目前“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。

4. 生物控制论与生物信息论 主要用控制论的理论与方法研究生物系统中信息的加工、处理,从而实现调节控制机制。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。

5. 理论生物物理 是运用数学和理论物理学研究生命现象的一个领域,既包括量子生物学和分子动力学等微观研究,也包括对进化、遗传、生命起源、脑功能活动及生物系统复杂性等宏观研究。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。

6. 光生物物理 光生物物理是研究光生物学中的光物理与原初光化学过程,即研究光的原初过程的学科。主要研究问题有:①光合作用;②视觉;③嗜盐菌的光能转换;④植物光形态建成;⑤光动力学作用;⑥生物发光与化学发光。

7. 自由基与环境辐射生物物理 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制及其产生效应的利用与防护基础研究。主要内容有:①自由基;②电离辐射的生物物理研究;③生物磁学与生物电磁学。

8. 生物力学与生物流变学 它的兴起是由于人们对认识生命运动规律、保护人类健康、生物医学工程和生物化学工程的需要。主要内容有:①生物流体力学;②生物固体力学;③其它生物力学问题;④生物流变学。其中血液流变学占主导地位,这是因为它与临床密切结合,所以发展特别迅速。

9. 生物物理技术 生物物理技术在生物物理中占有特殊的地位,以致成为该学科中不可缺少的一个重要组成部分。这是因为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的另一重要任务就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,生物物理学自身也在不断发展,充实新内容,开拓新领域。

### 三、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,属生命科学范畴。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的本质,发生疾病的机制问题,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 因对许多疾病的发生机制不清楚,故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,生物物理学已在这方面做了不少工作。现已知,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,

膜流动性增大, 细胞内水状态的改变等。在研究这些问题时, 广泛应用了荧光分析、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。从射线产生自由基及其具有顺磁性和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、毒物作用及心血管疾病中的一些环节等, 都和自由基有关。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临床实践中得到反映。生物物理学对疾病的诊断、治疗和预防上都日益显示了作用。血液流变学指标的测量对诊断红细胞增多症、慢性白血病、急性心肌梗死与冠状动脉栓塞症、糖尿病等, 都有明显的价值。1973年后开始出现的磁共振成像(MRI), 特点是能区分软组织, 且基本对人体无损伤, 许多方面优于X射线断层成像(X-CT), 已在诊断脑内及内脏疾病上得到应用。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, 被称为光敏氧化或光动力学作用。治疗方面引人注意的另一个例子是利用人工膜载带药物并定向引导到疾病部位, 达到治疗目的。用来携带药物的人工膜由类脂组成, 称为脂质体, 由脂类在水相中振荡生成。若事先在水相中溶有所需药物或酶, 则在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。载酶可克服血脑屏障, 治疗由于缺乏某种酶而引起的神经节苷脂贮积症; 载入基因可对细胞进行改造。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, 就要到来的21世纪医学一定会得到更大的发展。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外, 还必须寻找新手段, 这就要向生命本身学习。实际上, 有机体特别是人体本身具有各种极其精巧的、高效率的功能, 包括物质与能量转换, 信息处理, 比起现有科学技术它所能达到的程度远为完善和可靠, 若能把生物对象本身所具备的各种功能彻底搞清, 即可充分利用, 用人工的办法实现。为达此目的, 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, 且将越来越多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。

从以上三方面可以看出, 生物物理学和医学无论在机制、诊断与治疗方面都有很密切的关系。从国际、国内趋势来看; 在生物物理学的实际应用方面, 医学是一个最受重视的部门。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

生物力学是生物物理学中的一个重要组成部分,力学是研究力和运动的科学,生物学是研究生命的科学,因此生物力学是研究生物和力学有关问题的学科。生物力学研究内容有整体水平、器官水平、组织和细胞水平、亚细胞和分子水平、亚分子和量子水平上的问题。按照生物组织和材料的硬度和水分的程度分类,可以有生物固体力学、生物流体力学、生物软组织力学等;按照应力作用下流动与变形的关系来研究生物体及生物物质的特点,还有生物流变学;从能量转换的角度来研究生物力学问题,还有生物能力学。由上可知生物力学的内容是相当广泛和复杂的。

### 第一节 应力、应变、本构方程基础知识

#### 一、应 力

生物力学离不开力对生物体系统的作用,因此本节首先从力的介绍开始。

1. 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,如物体的重力和离心力等,单位是牛顿每立方米 ( $N/m^3$ )。面力是作用于物体表面上的力,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 ( $N$ )。

2. 内力 当物体受外力作用时,由于力的传递,在物体的任一部分与相邻部分之间会产生相互作用力,称为内力。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,可用一假想的平面,如图 1-1 (a) 和 (b) 中的  $m-n$  平面,研究此平面上不同点的力的大小和方向的分布,以及平面上总的内力  $F$  和内力矩  $M$ 。这种方法称为截面法。

3. 应力 内力是连续分布于截面上的,为了准确地反映截面上各点处的内力分布情况,我们引入应力的概念。设在图 1-1 (c) 所示的受力物体的  $m-n$  截面上,围绕 A 点取一小面积  $\Delta A$ ,  $\Delta P$  为作用在  $\Delta A$  上的分布内力的合力,那么在  $\Delta A$  上内力的平均应力为  $\Delta P/\Delta A$ 。当  $\Delta A \rightarrow 0$  时,平均应力的极限值为:

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

$P$  即为 A 点的应力。应力的常用单位是牛顿每平方米 ( $N/m^2$ )。应力是一个矢量。 $P$  通常可以分解成垂直于截面的法向分量  $\sigma$  和平行于截面的切向分量  $\tau$ , 如图 1-1 (d)。 $\sigma$  称为正应力, 正值为向外的拉力, 负值为向内的压力,  $\tau$  称为切应力 (或剪应力, 剪切应力)。

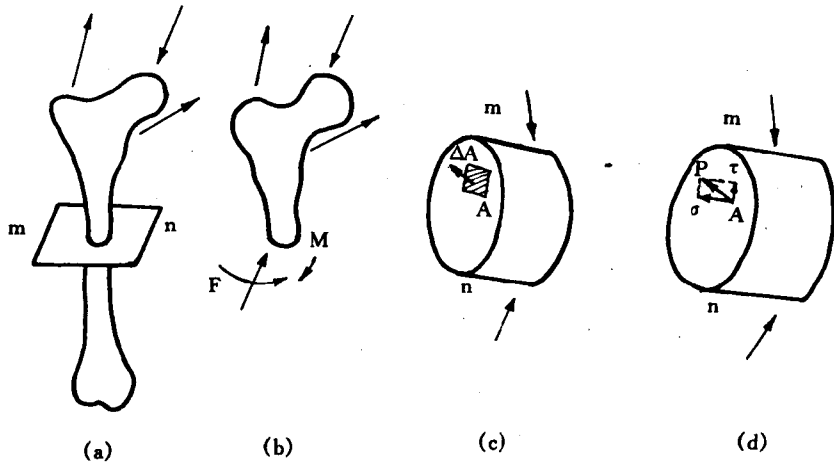


图 1-1 内力示意图  
 (a) 截面法求内力 (b) 内力 F 和内力矩 M  
 (c) 应力 (d) 正应力  $\sigma$  和切应力  $\tau$

## 二、应变和应变率

物体在外力作用下发生形状的改变，称为应变 (Strain, 中文译名还有胁变、形变、变形等)。应变可以归结为下列三种类型：

1. 长度的改变称为线应变，或长应变如图 1-2 (a) 所示，设有长形物体，长度为  $l$ ，左端固定，在右端的自由端上作用一个轴向拉力  $P$ ，则长形体在  $P$  的作用下长度改变为  $l + \Delta l$ ，其相对变形为：

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

相对变形常称为线应变或长应变，这是物体在正应力作用下的应变，它是一个无量纲数。当  $\Delta l$  为正 (+) 时，则  $\epsilon$  为正 (+)，表示物体在外力作用下伸长了，亦称为拉应变，即物体在拉应力作用下的应变。当  $\Delta l$  为负 (-) 时，则  $\epsilon$  为负 (-)，这时物体的长度在外力作用下缩短了，亦称为压应变，即物体在压应力作用下的应变。

还应当注意，当轴向伸长时 ( $\Delta l$  为正)，横向必定缩短 (即  $\Delta d$  为负)；反之，当轴向缩短时，横向伸长，即  $\Delta l$  为负， $\Delta d$  为正。比值  $\Delta d / \Delta l$  的绝对值称为泊松比，理论证明，一切材料的泊松比都小于 0.5，否则它在力学上是不稳定的。

2. 切应变 在切应力作用下，物体原是边长为  $a$  的正方形，变成了菱形，产生了形状的改变。如图 1-2 (b) 所示。这种在切应力  $\tau$  作用下产生的形变，称为切应变 (或剪应变)，用  $\gamma$  表示。 $\gamma$  定义为发生切应变时，角度  $\alpha$  的正切值，即  $\gamma = \tan \alpha = \Delta a / a$ ，称为切应变或剪应变， $\gamma$  值也是一个无量纲数。

3. 体应变 在正应力作用下发生体积上的应变，称为体应变 (或容积应变、体积应变、容应变)。体应变为  $\Delta V / V$ ，如图 1-2 (c) 示，这也是一个无量纲数。

4. 应变率和切变率 以上应变没有涉及时间，如果考虑应变的变化速率，即单位时间内增加或减少的应变，就称为应变率，有线应变率、切应变率和体应变率之分，其量纲为  $\text{秒}^{-1}$ 。

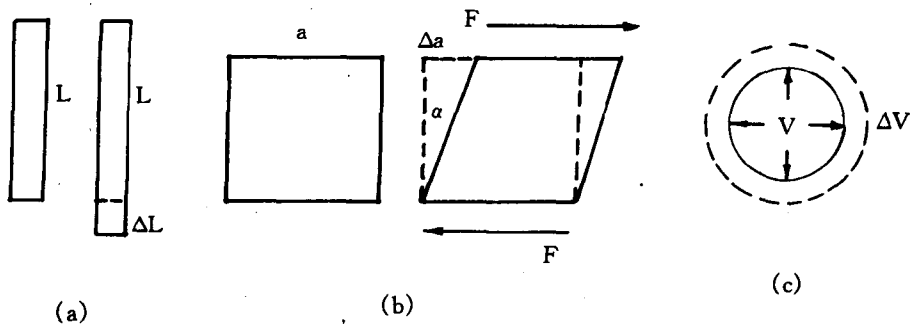


图 1-2 (a) 线应变 (b) 切应力作用下的切应变 (c) 体应变

### 三、本构方程简述

阐明应力、应变、应变率之间关系的方程式称为这种物质的本构方程 (Constitutive equation), 它取决于物体的结构。

1. 弹性体的本构方程——胡克定律 对于拉伸和压缩:  $\tau = Ee$ ; 对于剪切变形:  $\tau = Gt\alpha = G\dot{\gamma}$ ; 对于体积变形  $\tau = Kv$ 。上面式中  $\tau$  为应力,  $E$ 、 $G$ 、 $K$  分别为扬氏模量 (弹性模量)、刚性模量 (剪切模量) 和体积模量。 $e$ 、 $t\alpha$  和  $v$  分别为线应变、切应变和体应变。其变化规律和模型如图 1-3 (a) 和 (b) 所示, 如同一个弹簧经拉伸 (或压缩) 后, 应变与应力成正比, 从能量的观点看, 理想弹性材料变形时外力所作的功, 全部转变为应变能, 贮存在弹性体中, 所以在回弹时能全部地恢复原状。胡克定律可简述为各种应力与应变成正比, 其相应比值与应变率无关。

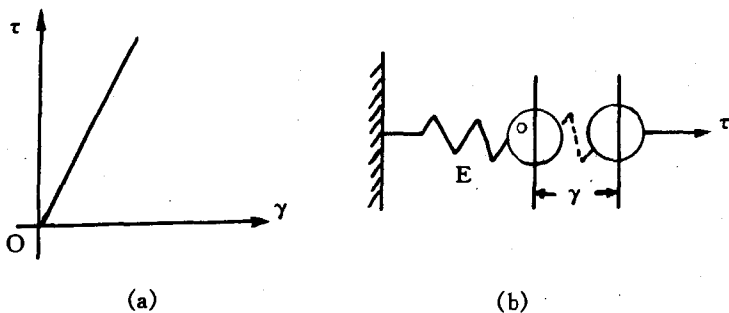


图 1-3 (a) 弹性体的应力和应变关系——胡克定律  
(b) 弹性元件模型

2. 粘性体的本构方程——牛顿粘度定律 粘性是物体形变时, 内部反抗形变的摩擦力的表现, 应力与应变率的最简单关系是二者成正比, 切应变率的相应公式为:

$$\tau = \eta d\dot{\gamma}/dt = \eta\dot{\gamma} \quad (1-3)$$

式中  $\eta$  称为粘滞系数, 简称粘度, 上式称为牛顿粘滞性定律。对于应用到液体的情况, 我们还将本书第二章中讨论。正应力与正应变率之间也有类似关系式, 但二者的粘滞系数并不相同。图 1-4 (a) 中的直线表达了应力和应变率之间的正比关系, 图 1-4 (b) 是一个粘性模型, 称为理想粘壶, 壶内盛有粘度为  $\eta$  的液体, 当右端施加应力, 粘壶逐渐被拉开, 产生应变; 应力与应变率  $\dot{\gamma}$  的关系符合牛顿粘性定律, 从能量观点来说, 产生的应变能全部被内摩擦损耗, 转变为热能。

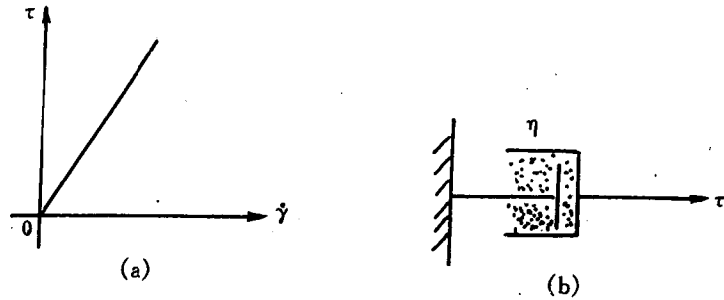


图 1-4 (a) 粘性体的应力应变率关系  
(b) 粘性元件模型

## 第二节 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，是由许多小分子聚集在一起的聚合物，称之为高分子聚合物，简称高聚物。工业产品中如橡胶、塑料等物质也都是高聚物。高聚物的分子间可以形成多种不同的三维结构，大致可分三类，如图 1-5 所示：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，分子间可相互滑动，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 3 倍；当被放松时，又能卷紧和弹开，分子又能回复到接近原来的尺寸。如弹性蛋白具有这种聚合态类似的性质。③纤维类，分子交联成定形的结构，结构如图 1-5 (c)，此类材料具有较高的弹性模量 ( $1-10\text{MN}/\text{m}^2$ )，如胶原纤维、骨骼等。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（线型或网状），聚合态和分子之间的作用有关。高聚物力学性质的特殊性表现在具有从弹性固体到粘性液体间所有的力学性质。换句话说，高聚物的力学性质介于弹性固体和粘性液体之间，即同时具有弹性固体的弹性和粘性液体的粘性。因此，通常称高聚物为粘弹性材料，具有粘弹性。粘弹性是高聚物的重要力学性质，反映应力与应变、应变率关系的本构方程极为复杂，在下面我们只介绍粘弹性的一些基本性质和较简单的本构方程。

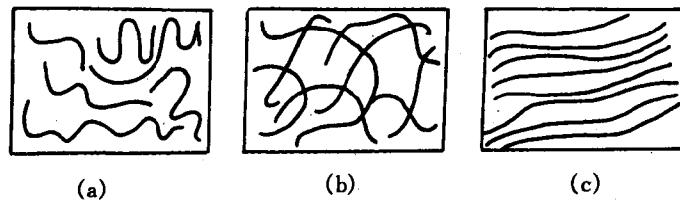


图 1-5 高聚物的三种聚合态  
(a) 分子不交联的无定形聚合态；(b) 分子交联的无定形聚合态；  
(c) 纤维类，分子交联成定形结构的聚合态

1. 延迟弹性 (Voigt 体) 胡克定律意味着弹性体的应变对应力的响应是瞬时即达到平衡。生物材料等高聚物，其应变对应力的响应，并不瞬时达到平衡，即应变滞后于应力。其原因在于大分子链的运动困难，当外力作用时，大分子链将逐渐调整其构象的变



化,表现出应变缓慢一些。延迟弹性是高聚物在恒定应力  $\tau_0$  的作用下,应变随时间逐渐增加,最后趋近于恒定值  $\tau_0/G$  (此处  $G$  是刚性模量),如图 1-6 (a) 所示。延迟弹性可用 Voigt 模型来模拟,该模型为一个弹性元件和一个粘性元件并联组成,如图 1-6 (b) 所示。当外力加在这个模型上时,最初大部分用来克服粘性元件的粘滞阻力,使之以一定的速度被拉长。当位移逐渐增加后,弹性元件的弹性力逐渐增大,粘性元件的粘滞阻力逐渐减少,模型拉长的速度逐渐减慢。最后,整个模型不再拉长,外力与弹性元件的弹性力保持平衡,这就达到最大位移。当外力撤除时,弹性元件回缩过程中需要克服粘性元件的粘滞阻力,应变只能逐渐减少到零,因此应变总是落后于应力的变化,这就表现了延迟弹性现象。

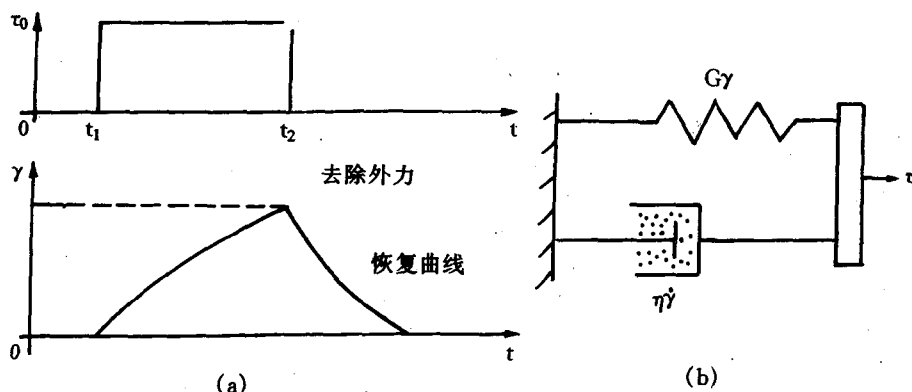


图 1-6 (a) 粘弹性体 Voigt 方程应力延迟弹性曲线  
(b) Voigt 粘弹性模型

图 1-6 (b) 的 Voigt 模型可以用以下本构方程来表达:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad (1-4)$$

$$\tau_1 = G\gamma \quad (1-5)$$

$$\tau_2 = \eta\dot{\gamma} \quad (1-6)$$

式中  $\tau_1$  代表弹簧,服从胡克定律,  $\tau_1$  为应力,  $G$  为刚性模量,  $\gamma$  为应变, 意义为应力与应变成正比; 式中  $\tau_2$  代表粘壶,服从牛顿定律,  $\tau_2$  为应力,  $\eta$  为牛顿粘度,  $\dot{\gamma}$  为切变率, 意义为应力与切变率成正比。总的应力为上述两者之和。这个本构方程是一个微分方程。

2. 应力松弛 高聚物在维持应变恒定不变下,分子新的构象将逐渐不需外力维持,应力将由于粘性而缓慢衰减,最后完全消失,如图 1-7 (a) 所示。这个现象称为应力松弛。应力松弛行为可用 Maxwell 模型来模拟,该模型由弹性元件和粘性元件串联组成,如图 1-7 (b) 所示。当外力加在这个模型上时,弹性元件立即被拉长,发生一定的形变。此后如果保持这个模型的总长度不改变,弹性元件的伸长量将由于粘性元件被拉长而逐渐减少,弹性力随之减弱,最后完全消失。Maxwell 模型的中心思想为粘弹性体的总切变率  $\dot{\gamma}$  由两部分组成,  $\dot{\gamma}_1$  示胡克定律部分,  $\dot{\gamma}_2$  示牛顿定律部分, 即  $\dot{\gamma}_1 = \tau/G$ ;  $\dot{\gamma}_2 = \frac{1}{\eta}\tau$ ,  $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_1 + \dot{\gamma}_2$ , 上式为图 1-7 的 Maxwell 模型的本构方程, 这也是一个微分方程。

3. 蠕变 高聚物在维持应力恒定不变的条件下,应变随时间变化的现象称为蠕变。粘滞性材料的应变通常由三种应变叠加而成,一种是弹性应变,它完全由该时刻的应力决定,随应力而变化;另一种是延迟弹性应变,在应力保持一定条件下,它需要经过一