



生物力学研究前沿系列
总主编 姜宗来 樊瑜波

生物材料力学与仿生学

Mechanics and Biomimetics of Biological Materials

冯西桥 主编



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

生物力学研究前沿系列
总主编 姜宗来 樊瑜波

生物材料力学与仿生学

冯西桥 主编



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书是“生物力学研究前沿系列”之一。本书介绍了生物材料力学及其仿生研究的若干新进展,重点是我国学者在近十多年取得的研究成果。全书共 11 章,其内容涵盖生物材料力学的基本理论、力学模型、实验方法及其仿生应用,大致可分为三个方面,其一是生物材料力学的基本问题与研究方法,涉及生物材料的表面浸润、黏附、断裂、减震与抗震机理等;其二是若干代表性生物材料的力学性质及其仿生应用,包括生物针刺、昆虫翅膀、皮肤、蜂窝、软材料与生物软组织等;其三是仿生力学及其应用,涵盖表界面仿生、壁虎仿生机器人、微型仿生飞行器等。

本书可供从事生物力学、固体力学、材料学、软物质科学、仿生学、机械工程等领域的科研人员 and 高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

生物材料力学与仿生学 / 冯西桥主编. —上海:

上海交通大学出版社, 2017

(生物力学研究前沿系列)

ISBN 978-7-313-18499-3

I. ①生… II. ①冯… III. ①生物材料—材料力学
②生物材料—仿生材料 IV. ①R318.08

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 300315 号

生物材料力学与仿生学

主 编: 冯西桥

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 谈 毅

印 制: 上海锦佳印刷有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

字 数: 366 千字

版 次: 2017 年 12 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-18499-3/R

定 价: 268.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 21.75

印 次: 2017 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-56401314

發展生物力学
造福人類健康

邬元楨

2016 七月廿一日

生物力学研究前沿系列 丛书编委会



总主编

上海交通大学,教授 姜宗来
国家康复辅具研究中心 北京航空航天大学,教授 樊瑜波

编 委

(按姓氏笔画排序)

北京航空航天大学,教授 邓小燕
中国科学院力学研究所,研究员 龙 勉
清华大学,教授 冯西桥
重庆大学,教授 吕永钢
上海体育学院,教授 刘 宇
上海交通大学,教授 齐颖新
上海交通大学医学院,教授 汤亭亭
大连医科大学,教授 孙秀珍
重庆大学,教授 杨 力



香港理工大学,教授 张 明

军事医学科学院卫生装备研究所,研究员 张西正

太原理工大学,教授 陈维毅

浙江大学,教授 季葆华

上海交通大学医学院,教授 房 兵

四川大学华西口腔医学院,教授 赵志河

总主编简介



姜宗来 博士,教授,博士生导师;美国医学与生物工程院会士(AIMBE Fellow);享受国务院政府特殊津贴,全国优秀科技工作者,总后勤部优秀教师;上海交大学生命科学技术学院教授;曾任上海交通大学医学院筹备组副组长和力学生物医学研究所所长;先后担任世界生物力学理事会(WCB)理事,中国生物医学工程学会副理事长、名誉副理事长,中国力学学会中国生物医学工程学会生物力学专业委员会(分会)副主任委员、主任委员,中国生物物理学会生物力学与生物流变学专业委员会副主任委员,国际心脏研究会(ISHR)中国分会执委,《中国生物医学工程学报》副主编和《医用生物力学》副主编、常务副主编等;长期从事心血管生物力学、力学生物学和形态学研究,培养博士后、博士生和硕士生 45 人,在国内外发表学术论文 100 余篇,主编和参编专著与教材 26 部,获国家科技进步奖三等奖(第一完成人,1999)、军队科技进步二等奖(第一完成人)和国家卫生部科技进步三等奖各 1 项,获国家发明专利 2 项、新型实用专利 1 项。



樊瑜波 博士,教授,博士生导师;美国医学与生物工程院会士(AIMBE Fellow);国家杰出青年科学基金获得者,教育部“长江学者”特聘教授,教育部跨世纪人才,全国优秀科技工作者,国家自然科学基金创新群体项目负责人,科技部重点领域创新团队带头人;现任民政部国家康复辅具研究中心主任、附属医院院长,北京航空航天大学大学生物与医学工程学院院长、生物力学与力学生物学教育部重点实验室主任、北京市生物医学工程高精尖创新中心主任;先后担任世界生物力学理事会(WCB)理事,世界华人生物医学工程协会(WACBE)主席,国际生物医学工程联合会(IFMBE)执委,中国生物医学工程学会理事长,医工整合联盟理事长,中国力学学会中国生物医学工程学会生物力学专业委员会(分会)副主任委员、主任委员,《医用生物力学》和《生物医学工程学杂志》副主编等;长期从事生物力学、康复工程、植介入医疗器械等领域研究,发表 SCI 论文 260 余篇,获国家发明专利近百项,获教育部自然科学一等奖和黄家驷生物医学工程一等奖等科技奖励。

本书主编简介



冯西桥 博士,教授,博士生导师;国家杰出青年科学基金获得者、教育部“长江学者”特聘教授、全国优秀科技工作者;现任清华大学工程力学系主任、生物力学与医学工程研究所所长,兼任中国力学学会中国生物医学工程学会生物力学专业委员会(分会)委员、北京国际力学中心秘书长、国际断裂委员会执委、*Engineering Fracture Mechanics* 主编等。主要研究领域为生物材料与仿生力学、细胞与组织生物力学、损伤与断裂力学,已发表专著 3 部,SCI 论文 260 余篇,SCI 他人引用 7 000 余次;获高等学校科学研究优秀成果自然科学奖一等奖 3 项、中国青年科技奖、全国优秀博士学位论文奖和全国优秀博士学位论文指导教师奖、霍英东教育基金会高等院校青年教师基金等奖励。

序 一

欣闻姜宗来教授和樊瑜波教授任总主编的一套“生物力学研究前沿系列”丛书,即将由上海交通大学出版社陆续出版,深感欣慰。谨此恭表祝贺!

生物力学(biomechanics)是研究生命体变形和运动的学科。现代生物力学通过对生命过程中的力学因素及其作用进行定量的研究,结合生物学与力学之原理及方法,得以认识生命过程的规律,解决生命与健康的科学问题。生物力学是生物医学工程学的一个重要交叉学科,对探讨生命科学与健康领域的重大科学问题作出了很大的贡献,促进了临床医学技术与生物医学材料的进步,带动了医疗器械相关产业的发展。

1979 年以来,在“生物力学之父”冯元桢(Y. C. Fung)先生的亲自推动和扶植下,中国的生物力学研究已历经了近 40 年的工作积累。尤其是近十多年来,在中国新一代学者的努力下,中国的生物力学研究有了长足的进步,部分研究成果已经达到国际先进水平,从理论体系到技术平台均有很好的成果,这套“生物力学研究前沿系列”丛书的出版真是适逢其时。

这套丛书的总主编姜宗来教授和樊瑜波教授以及每一分册的主编都是中国生物力学相关领域的学术带头人,丛书的作者们也均为科研和临床的一线专家。他们大多在国内外接受过交叉学科的系统教育,具有理工生医多学科的知识背景和优越的综合交叉研究能力。该丛书的内容涵盖了血管力学、生物力学建模与仿真、细胞分子生物力学、组织修复生物力学、骨与关节生物力学、口腔力学、眼耳鼻咽喉生物力学、康复工程生物力学、生物材料力学和人体运动生物力学等生物力学研究的主要领域。这套丛书立足于科技发展前沿,旨在总结和展示 21 世纪以来中国在生物力学领域所取

得的杰出研究成果,为力学、生物医学工程以及医学等相关学科领域的研究生和青年科技工作者们提供研究参考,为生物医学工程相关产业的从业人员提供理论导引。这套丛书的出版适时满足了生物力学学科出版领域的需求,具有很高的出版价值和积极的社会意义。可以预见这套丛书将能为广大科技工作者提供学术交流的平台,因而促进中国生物力学学科的进一步发展和年轻人才的培养。

这套丛书是用中文写的,对全球各地生物力学领域用中文的学者有极大意义。目前,生物力学这一重要领域尚无类似的、成为一个系列的英文书籍。希望不久的将来能看到这套丛书的英文版,得以裨益世界上所有的生物力学及生物医学工程学家,由此促进全人类的健康福祉。

钱煦

美国加州大学医学与生物工程总校教授

美国加州大学圣迭戈分校工程与医学研究院院长

美国国家科学院院士

美国国家工程院院士

美国国家医学院院士

美国艺术与科学院院士

美国国家发明家学院院士

中国科学院外籍院士

序 二

人体处于力学环境之中。人体各系统,如循环系统、运动系统、消化系统、呼吸系统和泌尿系统等的生理活动均受力学因素的影响。力是使物体变形和运动(或改变运动状态)的一种机械作用。力作用于机体组织细胞后不仅产生变形效应和运动效应,而且可导致其复杂的生理功能变化。生物力学(biomechanics)是研究生命体变形和运动的学科。生物力学通过生物学与力学原理方法的有机结合,认识生命过程的规律,解决生命与健康领域的科学问题。

20 世纪 70 年代末,在现代生物力学开创者和生物医学工程奠基人、被誉为“生物力学之父”的著名美籍华裔学者冯元桢(Y. C. Fung)先生的大力推动和热情关怀下,生物力学作为一门新兴的交叉学科在我国起步。随后,我国许多院校建立了生物力学的学科基地或研究团队,设立了生物力学学科硕士学位授权点和博士学位授权点。自 1982 年我国自己培养的第一位生物力学硕士毕业以来,陆续培养出一批接受过良好交叉训练的青年生物力学工作者,他们已逐渐成为我国生物力学学科建设和发展的骨干力量。20 世纪 80 年代以来,我国生物力学在生物流变学、心血管生物力学与血流动力学、骨关节生物力学、呼吸力学、软组织力学和药代动力学等领域开展了研究工作,相继取得了一大批有意义的成果,出版了一些生物力学领域的专著,相关研究成果也曾获国家和省部级的多项奖励。这些工作的开展、积累和成果为我国生物力学事业的发展作出了重要贡献。

21 世纪以来,国际和国内生物力学研究领域最新的进展和发展趋势主要有:一是力学生物学;二是生物力学建模分析及其临床应用。前者主要是生物力学细胞分子层次的机制(发现)研究,而后者主要是生物力学解决临床问题的应用(发明)研究,以生物力学理论和方法发展有疗效的或有诊断意义的新概念与新技术。两者的最终目的都是促进生物医学基础与临床以及相关领域研究的进步,促进人类健康。

21 世纪以来,国内生物医学工程、力学、医学和生物专业的科技人员踊跃开展生物力学的交叉研究,队伍不断扩大。以参加“全国生物力学大会”的人数为例,从最初几届的百人左右发展到 2015 年“第 11 届全国生物力学大会”,参会人员有 600 人之多。目前,国家自然科学基金委员会数理学部在“力学”学科下设置了“生物力学”二级学科代码;生命科学部也专为“生物力学与组织工程”设置了学科代码和评审组。在国家自然科学基金的持续支持下,我国的生物力学研究已有近 40 年的工作积累,从理论体系、技术平台到青年人才均有很好的储备,研究工作关注人类健康与疾病中的生物力学与力学生物学机制的关键科学问题,其中部分研究成果已达到国际先进水平。

为了总结 21 世纪以来我国生物力学领域的研究成果,在力学、生物医学工程以及医学等相关学科领域展示生物力学学科的实力和未来,为新进入生物力学领域的研究生和青年科技工作者等提供一个研究参考,我们组织国内生物力学领域的一线专家编写了这套“生物力学研究前沿系列”丛书,其内容涵盖了血管力学生物学、生物力学建模与仿真、细胞分子生物力学、组织修复生物力学、骨与关节生物力学、口腔力学生物学、眼耳鼻喉咽喉生物力学、康复工程生物力学、生物材料力学和人体运动生物力学等生物力学研究的主要领域。本丛书的材料主要来自各分册主编及其合著者所领导的国内实验室,其中绝大部分成果系国家自然科学基金资助项目所取得的新研究成果。2016 年,已 97 岁高龄的美国国家科学院、美国国家医学院和美国国家工程院院士,中国科学院外籍院士冯元桢先生在听取了我们有本丛书编写工作进展汇报后,欣然为丛书题词“发展生物力学,造福人类健康”。这一珍贵题词充分体现了先生的学术理念和对我们的殷切希望。美国国家科学院、美国国家医学院、美国国家工程院和美国国家发明家学院院士,美国艺术与科学院院士,中国科学院外籍院士钱煦(Shu Chien)先生为本丛书作序,高度评价了本丛书的出版。我们对于前辈们的鼓励表示由衷的感谢!

本丛书的主要读者对象为高校和科研机构的生物医学工程、医学、生物学和力学等相关专业的科学工作者和研究生。本丛书愿为今后的生物力学和力学生物学研究提供参考,希望能对促进我国生物力学学科发展和人才培养有所帮助。

在本丛书完成过程中,各分册主编及其合著者的团队成员、研究生对相关章节的结果呈现作出了许多出色贡献,在此对他们表示感谢;同时,对本丛书所有被引用和参考的文献作者和出版商、对所有帮助过本丛书出版的朋友们一并表示衷心感谢!感谢国家自然科学基金项目的资助,可以说,没有国家自然科学基金的持续资助,就没有我国生物力学蓬勃发展的今天!

由于生物力学是前沿交叉学科,处于不断发展丰富的状态,加之组织出版时间有限,丛书难免有疏漏之处,请读者不吝赐教、指正。

姜宗来 樊瑜波

2017 年 11 月

前 言



地球上生物的种类数以千万计。它们生活在海洋、湖泊、河流、草原、高原、森林、沙漠、冰川等条件迥异的自然环境中,并各自演化出完善而精致的生命系统,以高效的方式实现其食物获取、消化吸收、能量转化、遗传发育、运动迁移、控制导航、信息传递、行为调控等方方面面的生物学功能。这些纷繁复杂的生物学功能,其物质基础是生物体内种类繁多、形式多样、性质迥异的生物材料。

与人造材料相比,天然生物材料具有多方面的鲜明特征。其一,生物材料大都属于多相复合材料,有的由多种有机成分(如胶原蛋白、角蛋白、丝蛋白等蛋白质,纤维素、几丁质等多糖)复合而成,有的由有机相和矿物质(如羟基磷灰石、碳酸钙等)组成;其二,生物材料往往具有从分子、纳观、微观到宏观的多尺度多级结构特征,各个尺度分别对应着某些性质与功能,不同尺度间的协同效应也对一些性质与功能的实现起着关键作用;其三,生物材料在各个层面上实现了优化,其优化体现在各级结构的特征尺寸、几何形状、组成成分等方面,功能梯度、多孔结构、复杂的表界面结构等都是其优化得到的结果。由于同一种生物材料承载着多种功能,因此其优化是以有利于其生存的综合性能为目标的。此外,生物材料具有自我调节、主动式微结构演化与重构、损伤修复、自我防护等功能,对外界环境变化具有能量传输、物质重组等主动调控机制,其中涉及复杂的力学-化学-生物学耦合过程。

生物材料力学采用实验与理论方法,研究自然界中各种天然生物材料的力学性质及其各种响应过程的内在物理机制,揭示其力学性质、生物功能、几何结构、化学成分之间的基本关系,并将研究成果应用于生物医学、材料科学、机械工程等领域,为材料和结构的设计与优化提供仿生学概念与方法。它是生物力学的一个重要研究方向,属于力学与生命科学、材料学、物理学、化学等学科的交叉研究领域。

近年来,生物材料力学与仿生学的发展一日千里。一方面,认识和理解自然界的诸

多奇妙现象,是科学家广泛而持久的浓厚兴趣。生物材料力学借助于新的理论与实验手段,深入探究各种天然生物材料的物理性质、生物功能、材料成分、几何结构、生存环境等诸因素之间的内在有机联系,以及其性能和功能随机械力、温度、湿度、时间(如年龄)、疾病等因素的变化规律。另一方面,对于科技发展而言,大自然已为我们提供了大量绝妙的范例,人们可以从中得到各种启示,通过对大自然的学习、研究和模仿,寻求解决我们面临的能源、交通、材料、信息、医疗等领域诸多难题的答案和解决思路。人们越来越多地意识到,仿生设计不应停留在“形似”的层面,而应该提升到“神似”的更高水准。要做到“神似”,就需要对生物材料、组织、器官和系统进行深入的理论与实验研究,建立相应的定量化、系统化的理论模型、实验技术与计算方法,揭示其内在的物理规律,这是生物材料力学研究的核心任务。

作为“生物力学研究前沿系列”丛书的分册之一,本书介绍生物材料力学及其仿生研究的若干进展,重点是近十余年来我国学者在该领域的成果。为此,笔者邀请了我国从事生物材料力学与仿生学研究的一些知名学者,分别就相关主题进行撰写。其内容涵盖生物材料力学的基本理论、力学模型、实验方法及其仿生应用,大致可分为三个方面,其一是生物材料力学的基本问题与研究方法,涉及生物材料的表面浸润、黏附、断裂、减震与抗震机理等;其二是若干代表性生物材料的力学性质及其仿生应用,包括生物针刺、昆虫翅膀、皮肤、蜂窝、软材料与生物软组织等;其三是仿生力学及其应用,涵盖表界面仿生、壁虎仿生机器人、微型仿生飞行器等。由于本书篇幅所限,部分主题将在另册《仿生力学前沿》中阐述。

本书的出版,得到了各章著者的鼎力支持,在此对他们表示衷心感谢。从本书的立项、选题、编辑到出版,“生物力学研究前沿系列”的发起人和主编、上海交通大学姜宗来教授和北京航空航天大学樊瑜波教授给予了全方位的精心指导与帮助。清华大学生物力学与医学工程研究所赵红平副教授、李博副教授以及多位研究生做了大量细致的工作,这里一并致谢。

需要强调的是,生物材料力学与仿生学的研究内容十分广泛,研究方法与成果日新月异,虽然本书作者来自力学、仿生学、材料学、化学、机械工程等多个学科,但是依然难以涵盖该领域的诸多重要方面,本书内容难免挂一漏万。此外,对于书中存在的诸多错误与不妥之处,也敬请专家和读者批评指正。

冯西桥

2017年9月于清华园

目 录

1	绪论 / 冯西桥 赵红平	1
1.1	生物材料	1
1.1.1	生物材料的特点	1
1.1.2	生物材料的分类	2
1.2	生物材料力学	4
1.2.1	生物材料力学的定义	4
1.2.2	生物材料力学的发展历史	4
1.3	生物材料力学的研究内容	4
1.3.1	生物材料多尺度力学	5
1.3.2	生物材料表界面力学	7
1.3.3	运动生物力学	7
1.4	仿生力学	8
1.5	发展展望	10
1.6	本书内容简介	11
	参考文献	11
2	生物复合材料断裂力学 / 季葆华 王帆	15
2.1	生物复合材料概述	15
2.2	拉伸-剪切链模型	19
2.3	纳米尺度的断裂行为	21
2.3.1	纳米条带的断裂强度和缺陷不敏感行为	21

2.3.2	纳米薄板的缺陷不敏感行为	26
2.3.3	含中心或双边裂纹纳米条带的缺陷不敏感行为	28
2.4	矿物质晶体长细比的影响	30
2.5	珍珠母断裂的桥联模型	31
2.5.1	桥联模型	31
2.5.2	矿物质桥联的增韧效果	33
2.6	蛋白质基质的作用	35
2.7	蛋白质-矿物质界面	37
2.7.1	蛋白质与矿物质界面强度研究	37
2.7.2	界面裂纹萌生的模拟研究	38
2.8	多级结构的作用	40
2.8.1	自相似多级结构模型	40
2.8.2	多级结构的断裂损伤模型	42
2.9	新型仿生纳米复合材料	43
2.10	总结及展望	44
	参考文献	45

3 生物多梯度浸润性界面与仿生 / 郑咏梅 51

3.1	两种基本梯度——形状梯度以及表面能梯度	51
3.1.1	形状梯度	51
3.1.2	表面能梯度	52
3.2	生物表面的梯度特征与功能	52
3.2.1	润湿蜘蛛丝的方向集水性	53
3.2.2	超疏水蝴蝶翅膀的方向性黏附	56
3.2.3	微液在荷叶表面动态悬浮和微纳米结构润湿性梯度	60
3.2.4	荷叶叶缘限流	64
3.2.5	沙漠甲虫取水	68
3.2.6	水龟腿的疏水结构	70
3.2.7	水鸟啄食的毛细棘轮效应	71
3.3	典型梯度表面的可控制备	71
3.3.1	倾斜几何梯度表面的制备	72
3.3.2	曲率粗糙梯度纤维的制备	81
3.3.3	图案化梯度表面的制备	90
3.3.4	多尺度超疏水表面的制备	92
3.3.5	超顺磁阶梯疏水表面的制备	95
3.3.6	非对称的纳米结构表面的制备	97

3.4 小结	98
参考文献	98

4 蜂窝力学 / 王建祥 张凯 101

4.1 天然蜂窝的宏观结构及形成机制	102
4.2 天然蜂窝的多级微观结构	107
4.3 天然蜂窝材料和结构的多尺度力学特性	112
4.3.1 蜂蜡和蜜蜂丝的力学性能	112
4.3.2 蜂窝孔壁等效力学性能	116
4.3.3 蜂窝整体剪切性能	120
4.3.4 蜜蜂丝力学性能	122
4.4 天然蜂窝结构力学性能理论计算及有限元分析	126
4.4.1 天然蜂窝结构变形和温度影响的有限元分析	127
4.4.2 不同温度下天然蜂窝等效力学性能的理论分析	130
4.5 天然蜂窝的新型仿生设计	136
4.6 结语	137
参考文献	138

5 生物微针与仿生 / 马国军 吴承伟 141

5.1 人造微针概述	142
5.2 人造微针相关力学问题研究	144
5.2.1 微针刺入皮肤过程的力学行为研究	144
5.2.2 微针输药效率及疼痛方面的研究	148
5.3 生物微针研究进展	150
5.3.1 蚊子口针	150
5.3.2 蜜蜂和胡蜂的尾针	154
5.3.3 毛虫刚毛	158
5.4 仿生微纳锯齿针 / 刀	162
5.5 结束语	165
参考文献	165

6 蜻蜓翅膀的结构与仿生 / 仲政 169

6.1 蜻蜓翅膀的基本形貌	169
6.2 蜻蜓翅膀的微观结构	171