



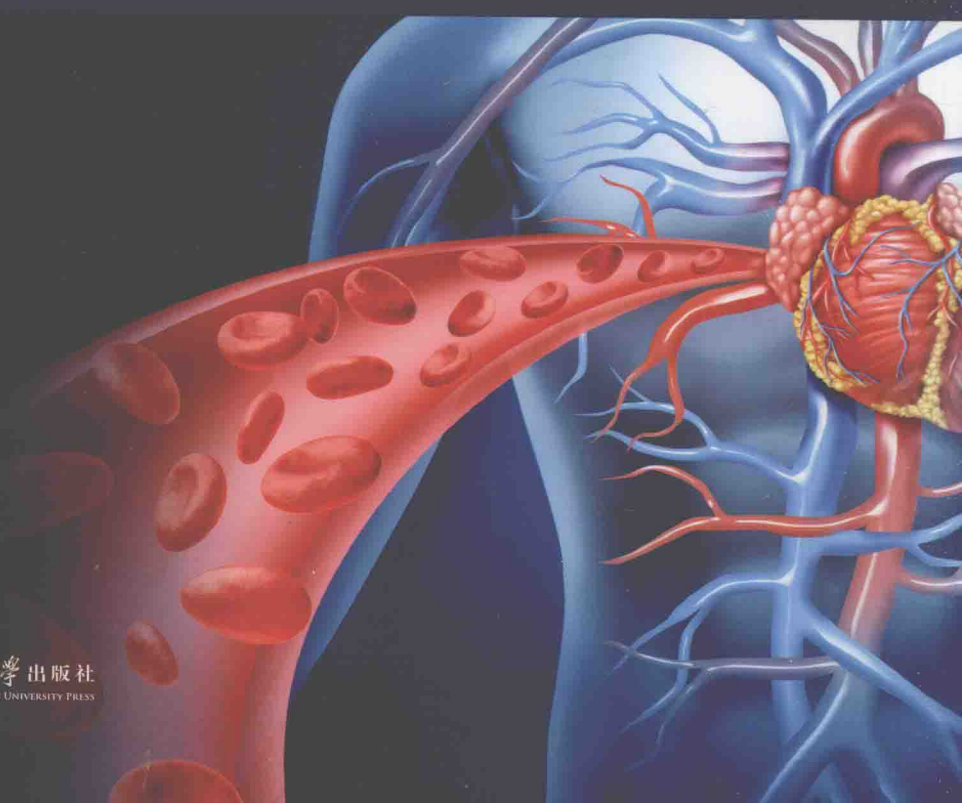
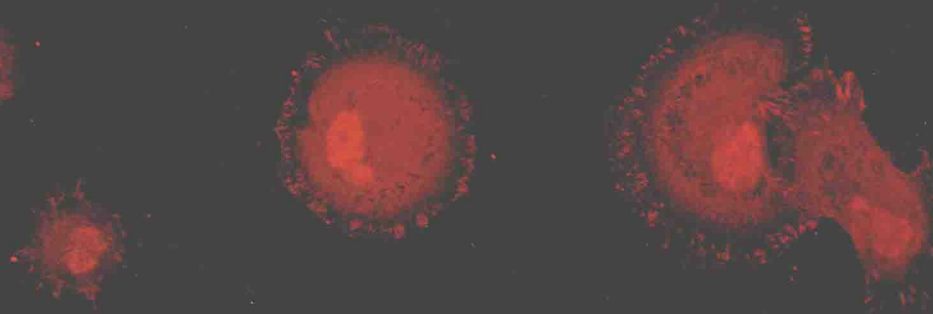
生物力学研究前沿系列
总主编 姜宗来 樊瑜波

血管力学生物学

Vascular Mechanobiology

姜宗来 齐颖新 主编

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





生物力学研究前沿系列
总主编 姜宗来 樊瑜波

血管力学生物学

姜宗来 齐颖新 主编



上海交通大学出版社

内容提要

本书是“生物力学研究前沿系列”之一。本书总结了近十余年来我国生物力学领域主要实验室在血管力学生物学研究中取得的新成果和新进展,探讨了在整体、组织和细胞分子多层次上血管对力学刺激的反应,以及心脑血管疾病发生发展的力学生物学机制等。

本书可供生物医学工程、医学、生物学和力学等相关专业的研究生和科研人员阅读参考。

血管力学生物学

图书在版编目(CIP)数据

血管力学生物学/姜宗来,齐颖新主编. —上海:
上海交通大学出版社, 2017
(生物力学研究前沿系列)
ISBN 978-7-313-18359-0

I. ①血… II. ①姜… ②齐… III. ①血管-生物力学 IV. ①R322.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 302556 号

血管力学生物学

主 编:姜宗来 齐颖新

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:996 千字

版 次:2017 年 12 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-18359-0/R

定 价:568.00 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:43.5

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

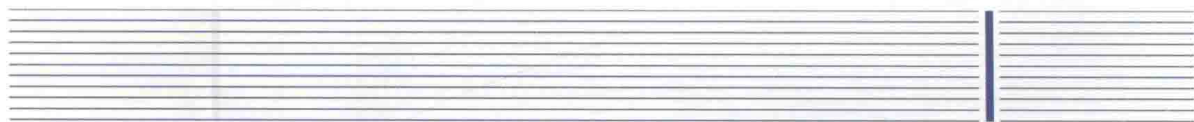
生物力学研究前沿系列
丛书编委会

發展生物力学
造福人類健康

冯元桢

2016 七月廿一日

军事医学科学院卫生装备研究所 会委编译丛



- 总主编 香港理工大学,教授 张 明
- 副总主编 军事医学科学院卫生装备研究所,研究员 张西正
- 编委 刘宝刚 大连理工大学,教授 太原理工大学,教授 陈维毅
- 浙江大學,教授 季葆华
- 委 员 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
- 编委 张小平 包拯, 李天通, 李德忠
- 编委 张 斌 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯
- 编委 张西正 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯
- 编委 张水昌 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯
- 编委 张 斌 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯
- 编委 张 斌 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯
- 编委 张 斌 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯
- 编委 张 斌 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯
- 编委 张 斌 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯, 包拯

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;上海交通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。

本书主编介绍



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。



齐颖新 博士,教授,博士生导师;国家杰出青年科学基金获得者、国家自然科学基金优秀青年科学基金获得者,入选教育部新世纪优秀人才支持计划和上海市青年科技启明星计划(A类);现任上海交通大学特聘教授、生命科学技术学院遗传与发育系主任、力学生物医学研究所所长,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)副主任委员、上海市力学学会生物力学专业委员会主任委员,《医用生物力学》、《生物医学工程杂志》和《力学季刊》杂志编委;从事心血管力学生物学研究,已在 *PNAS*、*Neno Lett*、*Cardiovasc Res* 等国内外学术期刊发表论文 50 余篇,主编与参编中文著作 3 部、参编英文著作 1 部,获得 2 项中国发明专利授权。

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

心脑血管病是危害人类生命健康最严重的疾病之一,心脑血管病治疗的巨额费用成为家庭、社会和国家的沉重负担。探讨心脑血管病发病机制,从而更有效地防治心脑血管病是世界各国共同关注的重大科学问题。心脑血管病包括高血压、动脉粥样硬化和脑卒中等,其本质都是血管疾病,都有共同的发病学基础和基本的病理过程,表现为心血管细胞迁移、肥大、增殖和凋亡等,具有细胞表型和形态结构与功能的改变,即发生血管重建(remodeling)。

生物体处于力学环境之中,力学因素影响机体的整体、器官、组织、细胞和分子等各层次的生物学过程。心血管系统可以视为一个以心(机械泵)为中心的力学系统。血液循环过程包含着血液流动、血细胞和血管的变形、血液和血管的相互作用等,其中均蕴藏着丰富的力学规律。血管重建受生物、化学和物理等多种体内外因素的影响,其中力学因素在血管重建中直接而明显的重要作用已被许多临床和实验研究所证实,逐渐成为人们的共识。选择血管重建为切入点,探讨心脑血管病的一些共同和普遍的发病机制,这一研究方式将更适合于心脑血管病多基因、多致病因素的复杂特点。随着现代科学技术的进步,新兴交叉学科的出现为探讨生命科学与健康领域的重大科学问题带来了新的契机,多学科的综合交叉研究所产生的新思路、新技术和新突破,有望为最终实现对心脑血管疾病进行有效的预警、诊断和防治作出贡献。

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。近十多年来,随着生物力学研究深入到细胞分子水平,生物力学自身也在不断发展,“力学生物学”(mechanobiology)逐渐成了生物力学一个新的交叉学科前沿领域。力学生物学研究力学环境(刺激)对生物体健康、疾病或损伤的影响以及生物体的力学信号感受和响应机制,阐明机体的力学过程与生物学过程,如生长、重建、适应性变化和修复等之

间的相互关系,从而发展有疗效的或有诊断意义的新技术,促进生物医学基础与临床研究的发展。心血管力学生物学研究是从整体—器官—细胞—蛋白—基因不同层次上,综合探讨心血管的“应力—生长”关系,以血管重建为切入点,着眼于力学环境对心血管系统作用,阐明力学因素如何产生生物学效应而诱导血管重建,研究心血管力学信号转导(mechanotransduction)通路和网络调控机制;寻找力学因素对心血管作用的潜在药物靶标或新的生物标记物;从细胞分子水平深入了解心血管活动和疾病发生的本质,为寻求心血管疾病防治的新途径奠定力学生物学基础。

我国的生物力学研究已有 30 多年的工作积累,尤其在血管力学生物学这一前沿领域,部分工作已进入了国际先进行列,从理论体系到技术平台,均有很好的储备,蓄势待发,适逢其时。本书旨在总结 21 世纪以来我国血管力学生物学研究的成果,展示我国生物力学研究的实力与未来,为相关学科的科技工作者提供教学和研究的专业学术参考。本书的材料主要来自作者及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最新研究成果。本书的主要内容包括:血管生物学基础,血管力学基础,血管力学生物学研究常用实验技术,力—血管蛋白质组学,血管细胞的应力响应以及力学因素对血管内皮细胞、血管平滑肌细胞和血管内皮祖细胞分化、增殖、迁移和凋亡的影响及其机制,应力与血管重建,动脉粥样硬化与血管支架介入治疗的力学生物学等。本书的特色:一是选择力学规律与作用最直接而明显的心血管系统,系统探讨“力学因素—生物学效应—血管重建”的机制,为心血管基础与疾病防治研究提供新的力学生物学视角;二是将蛋白质组学等生物学高通量实验新技术引入生物力学,将生物实验研究与力学建模仿真有机结合,实现学科交叉和融合。

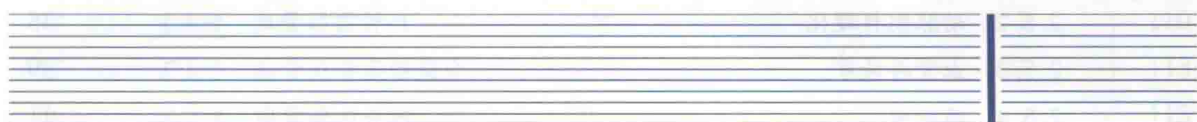
在本书完成过程中,作者和合著者的团队成员、博士生对相关章节的结果呈现作出了许多出色贡献,在此对他们表示感谢;同时,对本书所有引用和参考的文献作者和出版商、对所有帮助过本书出版的朋友们一并表示衷心感谢!感谢国家自然科学基金项目的资助,可以说,没有国家自然科学基金的持续资助,就没有我国生物力学蓬勃发展的今天!

由于本书从组稿到出版,时间相对紧促,存在的纰漏之处,望读者不吝赐教、指正,以利于我们改正和提高。

姜宗来 齐颖新

2016 年 3 月于上海

目 录



1 绪论：从生物力学到力学生物学 / 姜宗来 1

- 1.1 生物力学的发展与冯元桢先生的贡献 1
 - 1.1.1 肺循环片流理论 3
 - 1.1.2 血管残余应力理论 3
 - 1.1.3 应力-生长理论 4
 - 1.1.4 组织工程理论与基因水平的研究 5
- 1.2 力学生物学的概念与发展 6
- 1.3 生物力学在我国的发展概况 17
- 1.4 血管力学生物学研究进展 18
- 1.5 结语 11
- 参考文献 12

2 血管生物学基础 / 姜宗来 15

- 2.1 心血管系统的组成与血液循环的概念 15
 - 2.1.1 心血管系统的组成 15
 - 2.1.2 血液循环的概念 17
- 2.2 血管的发生与发育 18
 - 2.2.1 原始心血管系统的发生 18
 - 2.2.2 原始血管与胚体内外循环的建立 19
 - 2.2.3 原始血管的演变 19
- 2.3 血管的组织结构 21

2.3.1	动脉	21
2.3.2	毛细血管	23
2.3.3	静脉	24
2.3.4	微循环的概念	25
2.4	血管的生理基础	26
2.4.1	各类血管的功能特点	26
2.4.2	动脉血压的形成及其影响因素	26
2.4.3	血管活动的调节	29
2.5	血管的病理基础	33
2.5.1	高血压	33
2.5.2	动脉粥样硬化	35
2.5.3	血管再狭窄	39
2.5.4	动脉瘤	41
	参考文献	42

3 血管内皮细胞与平滑肌细胞 / 冀凯宏 熊俊 45

3.1	血管内皮细胞	46
3.1.1	血管内皮细胞的起源	46
3.1.2	血管内皮细胞的形态和分类	47
3.1.3	血管内皮细胞的超微结构	48
3.1.4	血管内皮细胞的生理功能	55
3.1.5	血管内皮功能障碍	59
3.1.6	血管内皮祖细胞与血管形成	59
3.2	血管平滑肌细胞	62
3.2.1	血管平滑肌细胞的起源和生长发育	62
3.2.2	血管平滑肌细胞的结构	63
3.2.3	血管平滑肌细胞的功能	72
3.2.4	血管平滑肌细胞收缩和舒张的调节	76
3.3	血管内皮细胞与平滑肌细胞的相互作用	80
3.3.1	血管内皮细胞对血管平滑肌细胞生长的影响	81
3.3.2	内皮细胞和血管平滑肌细胞在动脉粥样硬化形成中的作用	82
	参考文献	82

4 血管力学基础 / 刘肖 龚晓波 孙安强 邓小燕 85

4.1	力学基本概念	86
-----	--------	----

4.1.1	固体力学基本概念	86
4.1.2	流体力学基本概念	94
4.1.3	本构方程	99
4.2	血液的流变学特性	100
4.2.1	血液的牛顿与非牛顿特性	100
4.2.2	血液的非牛顿特性对大中动脉血流动力学的影响	102
4.2.3	影响血液黏性的因素	102
4.2.4	血液黏度的几种测试方法	105
4.3	血管力学分析	107
4.3.1	血管的本构关系	107
4.3.2	血管的黏弹性	110
4.3.3	血管力学实验简介	113
4.3.4	圆管受力分析	115
4.3.5	薄壁圆管的受力分析	117
4.4	血流动力学介绍	117
4.4.1	体循环力学简介	118
4.4.2	平直血管内血液的流动	120
4.4.3	血流动力学测量技术简介	122
4.5	血管力学与血管疾病	126
4.5.1	动脉粥样硬化	126
4.5.2	动脉瘤	127
4.6	血管疾病诊疗技术的力学基础	128
4.6.1	动脉粥样硬化治疗	128
4.6.2	动脉瘤诊疗	130
	参考文献	132

5 血管力学生物学研究常用实验技术与方法

/ 沈宝荣 张萍 姜宗来 137

5.1	在体血管应力变化的实验动物模型	137
5.1.1	高血压动物模型	137
5.1.2	低血流(低切应力)动物模型	139
5.1.3	静脉移植动物模型	140
5.2	体外培养细胞力学加载技术	142
5.2.1	细胞切应力加载模型	142
5.2.2	细胞周期性张应变加载模型	148
5.2.3	微管吸吮技术	152

5.2.4	原子力显微技术	152
5.2.5	磁扭转细胞测量术	152
5.3	在体动物模型血管重建检测的相关实验技术	153
5.3.1	血压测定	153
5.3.2	血流测定	154
5.3.3	血黏度测定与平均切应力计算	154
5.3.4	血管几何形态学检测	155
5.3.5	血管张开角检测	156
5.3.6	血管容积(V)与压力(P)比值($P-V$ 关系)测定	157
5.3.7	血管细胞外基质检测	157
5.4	体外细胞培养及常用细胞分子生物学实验技术	158
5.4.1	大鼠胸主动脉内皮细胞原代培养	159
5.4.2	大鼠胸主动脉平滑肌细胞原代培养	159
5.4.3	人血管内皮祖细胞原代培养	160
5.4.4	人脐静脉内皮细胞原代培养	161
5.4.5	siRNA 干扰技术	162
5.4.6	过表达技术	162
5.4.7	细胞功能检测技术	163
5.5	显微成像实验技术	169
5.5.1	激光共聚焦显微镜	170
5.5.2	单细胞成像技术	170
5.6	高通量生物实验技术	173
5.6.1	微阵列芯片技术	173
5.6.2	蛋白质组学技术	176
5.6.3	生物信息学分析	179
	参考文献	180
6	应力与血管重建 / 杨向群 严志强 姜宗来	183
6.1	高血压动脉重建	184
6.1.1	高血压肾内小动脉重建及其生物力学特性	184
6.1.2	高血压主动脉重建及其生物力学特性	186
6.1.3	高血压动脉重建的力学生物学机制	187
6.2	低血压或低压力条件下的动脉重建	190
6.3	切应力与血管重建	191
6.3.1	低切应力对动脉重建的影响	192
6.3.2	切应力调节动脉内弹性膜窗影响动脉壁大分子物质聚集	193