

顾志华 高瑞亭 主编

# 骨伤生物力学基础

GUSHANG SHENGWU  
LIXUE JICHU

天津大学出版社

## 内 容 提 要

本书介绍骨伤生物力学基础知识，骨的力学性质，关节与脊柱力学，骨的功能适应性理论，国内外治疗骨折的概况和发展趋势。书中还列举分析了一些中医、西医和中西医结合治疗骨折的典型实例。

本书适合于大专院校骨伤科和医疗器械等专业的师生使用，也可作为骨科医生、卫生保健、法医骨学等专业人员的培训教材和知识更新用书。

### 骨伤生物力学基础

顾志华 高瑞亭 主编

\*

天津大学出版社出版

(天津大学内)

河北省永清县印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

\*

开本：787×1092毫米<sup>1/16</sup> 印张：19<sup>1/4</sup> 字数：477千字

1990年12月第一版 1990年12月第一次印刷

印数：1—2000

ISBN 7-5618-0221-8

Q·3

定价：3.85元

## 前 言

骨伤生物力学是生物力学组成部分之一。它从已确立的力学原理和骨的功能适应性等理论出发，研究骨组织的力学特性，骨的断裂与重建的力学问题，骨伤愈合、修复与外力的关系，以及骨愈合的控制论等。本书以提高临床疗效和普及骨伤生物力学理论为目的，介绍了骨伤生物力学基础知识；骨的力学性质；关节与脊柱力学；骨的功能适应性理论。书中还试分析了中医、西医和中西医结合治疗骨折的一些实例，并介绍了国内外治疗骨折的概况及发展趋势。希望本书能对骨伤生物力学的初学者和临床医生有所帮助，并沟通力学工作者和骨科医生间的关系。

该书以1983年在保定举办的第一期“全国骨科医生生物力学学习班”用的《骨伤生物力学基础》讲义为基础，参考杨桂通、尚天裕、郭世绂、白祥、孟和等教授在该学习班上的授课讲稿以及近几年骨伤生物力学的有关文献，并吸收作者的一些研究成果，同时征求几年来用该讲义的教师和学员的意见，经补充、修订而成。

本书适用于骨科医生自学，也适于大专院校骨伤科和医疗器械专业师生等阅读。

本书由顾志华、高瑞亭主编，由顾志华（第一章、第二十章）、周祖威（第二章至第六章、第二十章）、张文沂（第七章至第十一章）、高瑞亭（第十二章至第十四章）、华筑信（第十五章、第十二章、第十六章、第十九章）、林振福（第十七章、第十八章）执笔，附录由张蒲执笔。全书由周祖威统稿。

本书由北京医科大学第二临床学院赵钟岳教授审阅，并提出了很好的意见，在此表示衷心的感谢。

限于我们的水平，书中难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。

作 者

1989年2月

# 目 录

## 第一章 概论

- §1.1 生物力学概述..... (1)
- §1.2 骨生物力学..... (5)

## 第二章 力

- §2.1 力的概念..... (13)
- §2.2 力的特征..... (14)
- §2.3 几种常见的力..... (15)
- §2.4 肌肉力..... (17)
- §2.5 力的分量..... (19)
- §2.6 肌力的稳固分量与转动分量..... (21)
- §2.7 约束与约束反力..... (22)
- §2.8 力矩..... (24)
- §2.9 力偶..... (26)

## 第三章 静力平衡

- §3.1 基本概念..... (28)
- §3.2 力的可传性..... (29)
- §3.3 二力平衡与三力平衡..... (29)
- §3.4 受力分析与受力图..... (31)
- §3.5 共点力系的简化与平衡..... (33)
- §3.6 共点力系的若干骨力学实例..... (35)
- §3.7 平面力系的简化与平衡..... (37)
- §3.8 平面力系的若干骨力学实例..... (40)
- §3.9 空间力系的简化与平衡..... (44)
- §3.10 肱二头肌功能的力学分析 (前臂骨折的复位固定) ..... (47)
- §3.11 重心 ..... (49)

## 第四章 牛顿运动定律

- §4.1 质点运动学..... (52)
- §4.2 牛顿第二运动定律..... (59)
- §4.3 质点的运动微分方程..... (60)
- §4.4 牛顿定律的应用..... (60)

## 第五章 动量与冲量

- §5.1 动量..... (64)
- §5.2 动量定理..... (64)

§5.3	质心运动定理	(65)
§5.4	平动刚体运动微分方程	(67)
§5.5	冲量	(69)
§5.6	冲量定理	(69)
§5.7	碰撞	(70)
§5.8	如何避免胫骨骨折	(71)
§5.9	脑震荡及伤势指数	(73)
<b>第六章 功与能</b>		
§6.1	力的功	(75)
§6.2	功率与代谢率	(77)
§6.3	动能	(78)
§6.4	动能定理	(79)
§6.5	转动刚体的运动微分方程 (角动量定理)	(81)
§6.6	动物的奔跑速率	(83)
§6.7	势能	(84)
§6.8	机械能守恒定律	(84)
§6.9	垂直上跳时肌力的功率与代谢率	(85)
§6.10	虚功原理	(87)
<b>第七章 生物固体力学的基本概念</b>		
§7.1	生物固体力学的研究任务和方法	(91)
§7.2	材料力学的基本假设	(92)
§7.3	基本概念	(93)
<b>第八章 轴向拉伸和压缩</b>		
§8.1	轴向拉压时的应力和应变	(103)
§8.2	材料拉压时的力学性质	(104)
§8.3	骨拉伸和压缩试验及各种因素的效应	(108)
§8.4	轴向拉压时斜截面上的应力	(118)
§8.5	强度条件	(120)
§8.6	应力集中	(120)
§8.7	拉压中的超静定问题	(121)
<b>第九章 剪切和扭转</b>		
§9.1	剪切概念及实用计算	(123)
§9.2	薄壁圆筒的扭转	(126)
§9.3	等直圆杆扭转时的应力和应变	(127)
§9.4	非圆截面杆的扭转	(132)
<b>第十章 弯曲</b>		
§10.1	弯曲内力	(135)
§10.2	弯曲时的应力和强度计算	(137)
§10.3	弯曲变形及刚度计算	(143)

§10.4	骨的弯曲试验 .....	(149)
<b>第十一章</b>	<b>组合变形的强度计算</b>	
§11.1	一点的应力状态 .....	(154)
§11.2	一点的应变状态和应力状态的关系 .....	(159)
§11.3	强度理论 .....	(163)
§11.4	斜弯曲 .....	(164)
§11.5	拉伸(压缩)与弯曲组合 .....	(166)
§11.6	弯曲和扭转的组合 .....	(170)
<b>第十二章</b>	<b>肩、肘关节生物力学</b>	
§12.1	肩关节生物力学 .....	(172)
§12.2	肘关节生物力学 .....	(176)
<b>第十三章</b>	<b>膝、髌、踝关节生物力学</b>	
§13.1	膝关节生物力学 .....	(181)
§13.2	髌关节生物力学 .....	(189)
§13.3	踝关节生物力学 .....	(196)
<b>第十四章</b>	<b>脊柱生物力学</b>	
§14.1	脊柱的功能单元——运动节段 .....	(200)
§14.2	脊柱的活动幅度 .....	(204)
§14.3	脊柱的力学分析 .....	(205)
§14.4	脊柱侧凸矫形的受力分析 .....	(210)
<b>第十五章</b>	<b>骨的力学性质(续)</b> .....	(213)
<b>第十六章</b>	<b>长骨的受力状态及作为活器官骨的功能适应性</b>	
§16.1	长骨的受力状态 .....	(221)
§16.2	骨是有生命的器官 .....	(223)
§16.3	骨的功能适应性 .....	(227)
<b>第十七章</b>	<b>骨折修复与骨折治疗原则</b>	
§17.1	骨折修复过程 .....	(231)
§17.2	有关骨折修复的几个问题 .....	(232)
§17.3	影响骨折修复的因素 .....	(233)
§17.4	骨折的治疗原则与一般方法 .....	(233)
<b>第十八章</b>	<b>骨折固定的方法及其进展</b>	
§18.1	发展概况 .....	(239)
§18.2	小夹板外固定 .....	(239)
§18.3	石膏绷带固定 .....	(240)
§18.4	持续牵引固定 .....	(242)
§18.5	骨穿针外固定 .....	(242)
§18.6	髓内钉固定 .....	(246)
§18.7	加压钢板螺丝钉 .....	(249)
<b>第十九章</b>	<b>骨折与骨折治疗的生物力学</b>	

§19.1	骨折的断裂形式及载荷方式	(253)
§19.2	骨折治疗的生物力学	(254)
§19.3	内固定方法的生物力学问题	(256)
§19.4	关于内固定板改进的生物力学讨论	(258)
§19.5	外固定方法的生物力学	(265)
<b>第二十章 骨生物力学原理在中医和中西医结合治疗骨折中的应用</b>		
§20.1	夹板局部外固定治疗骨干骨折的生物力学原理简析	(267)
§20.2	骨干骨折断面倾角与骨牵引关系的探讨	(270)
§20.3	骨科复位固定器整复骨干骨折的力学研究	(274)
§20.4	骨科复位固定器稳定性的实验研究与骨针承载能力的计算	(280)
<b>附录 矢量运算简介</b>		
§1	矢量代数	(286)
§2	矢量函数的微分和积分	(290)
<b>参考文献</b>		(296)

# 第一章 概 论

生物力学是当前活跃在自然科学前沿的新兴边缘学科之一。作为一门独立的学科，它在国际上迄今才有20多年历史。

## § 1.1 生物力学概述

### 一、什么叫生物力学

生物力学是研究生物体中力学问题的科学，是力学、生物学、医学等学科之间相互渗透的边缘学科。它将这些学科的基本原理和方法有机结合起来，并广泛应用了物理学和数学的概念及方法。

它研究的范围极广。从鸟飞、鱼游到鞭毛虫和变形虫的运动，从人的整体到各部分器官（包括血液和红细胞）的运动，以及植物体液的输送等都是生物力学的研究对象。它采用比生物学还要基本和详细的方法来探索生命运动的某些规律。

生物力学体现了现代科学的发展。它具有科学间彼此渗透、相互交叉、紧密联系的特点。

生物力学具有不同的分类方法。按照研究对象，生物力学可分为：生物固体力学，生物流体力学，生物工程学。根据研究结果的未来实际应用范围，生物力学又可分为：工程生物力学，医学生物力学，体育运动生物力学等。

### 二、研究生物力学的意义

1. 生物力学是诊断学、外科学、修复学、骨科学等医学学科的理论基础，与人类健康有着密切关系。许多事实证明，正确认识并应用生物力学规律，可以挽救许多患者的生命，而不懂或误用生物力学知识会使不少人死于非命；人对生命过程及自身的了解还很不够，对许多常见现象还不知其所以然。因此，用近代自然科学的理论和方法研究生命现象已成为现代科学的一个重要领域。生物力学就是其中的一个分支学科。

生物力学包括生物组织和器官的材料力学、循环系统的流体力学、生物活动能量的热力学等方面。它用力学的观点和方法定量地分析研究生物系统功能和构造的关系。所以，它是深刻认识生命世界的基础之一。

世界著名生物力学家冯元桢博士说过：“如果没有生物力学则有些生物问题就不能领会，这就好象没有空气动力学就不能造出一架好的飞机。对于一架飞机，力学可使我们设计它的结构，预示它的性能。对于一个器官来说，生物力学能够帮助我们了解该器官的正常功能，以及由功能的变化来预示器官的变化，并指出人为的改进方法。因而，诊断学、外科学、修复学等都紧密与生物力学联系在一起。”如血液流体动力学，就是诊断、医治心血管疾病的理论基础。近20多年来，人工心瓣的发展虽然十分迅速，探索过的瓣型不下数十种，但存在的问题仍然不少，真正在临床上得到应用的为数不多，而且一开始就存在的主要问题，如生物瓣的钙化问题、机械瓣的血栓问题，至今仍未解决。这里，除生理、病理、



材料等问题外，很重要的原因，就是对天然心瓣和人工心瓣的血流动力学研究不够，而该问题的解决对完善人工心脏是不可缺少的一环。此外，生物力学还对牙齿疾病、颈脑和脊柱损伤等提供了理论基础和治疗手段。

许多骨科工作者越来越感到，想搞清骨骼方面的问题，提高医疗水平，没有生物力学的指导是很困难的。生物力学可帮助骨科工作者设计新型医疗器械、假肢、人工关节，可提供合理的手术方案，确定符合骨伤愈合规律的治疗原则。生物力学已成为骨科医师必备的基础知识。

2. 生物力学是力学向生物学、医学的渗透，又是促进力学本身发展的一种动力。目前，力学涉及的是与外界环境没有物质交换的封闭系统热力学，而这一基本概念应用到生物体中就不行了。因此，创立开放系统的热力学十分必要，也是生物力学发展的关键。生物力学不仅扩大了力学的研究对象，也丰富了力学的研究内容。如粘性流动理论就是发轫于血流实验，动脉流型分析促进了脉动流稳定性理论的研究。就1975年第73届欧州力学会议上有关粘性流体脉动流的文章来看，都是以生物流体为目标的。又如，对小血管流异常现象的探索推动了流体力学新分支——微流体动力学的发展。

3. 研究生物力学的意义还在于将自然的启示应用于工程技术，形成仿生学。20亿年自然选择形成的种种生物，其性能往往比人造机器优越得多。生物体在长期演化过程中逐步淘汰了不适合功能需要的部分，使自己的肌体达到所处环境的最佳状况。生物系统构造一功能关系的研究，为新材料、新技术、新装置的发明及新颖设计思想的产生提供了不竭源泉。如在设计水中的航行工具时，经常需考虑最佳外形、最佳推进方式和最佳操作方式。由于自然选择，具有这种优点的水生物较容易存在下来。因此，研究某些水生物的运动可以得到一些值得借鉴的知识。海豚便是一例。它是一种高级动物，具有高效率的推进机制和很好的外形。特别是他的皮肤，分为两层，其间充满了弹性纤维和脂肪组织，具有特别的减阻特性。因为在高速运动时它的皮肤对边界层中压力梯度变化十分敏感，能以适当的弹性变形降低逆压梯度，使表皮能产生波状运动，从而保持层流边界层状态抑制湍流出现。过去的鱼雷前进速度较慢，因为它在运动中，周围产生大量湍流，增加了阻力，人们仿制海豚皮蒙于鱼雷体外，大大增加了鱼雷航速。还可举出以下实例：树根符合应力最佳分布状况，对它的研究，为设计高烟囱、电视塔等建筑提供了很好的资料；从鸟的飞翔中得到启示制造了飞机，最初船体的设计是基于对鱼的外形观察；由于模仿人的动作而创造了机械手和机械人等等。这些成就都是在对生物体的结构和运动作了深入研究后而得到的。总之，力学仿生已在建筑、军事、宇航、机械、医疗、材料科学等各方面显示了自己的生命力。

4. 在保健科学上，生物力学也有着重大意义。大多数生物力学研究的目的都在于增加对生命系统的整体了解，以及人工补救。如人工心脏瓣膜，虽然已经普遍应用，但仍存在如何提高寿命、尽可能减少对血液的损害、消除有害血液与人工材料表面的相互作用、简化抗凝处理等问题。在进一步研究人工心脏瓣膜时，为了使这些问题得以改进，就必须研究血液在心脏内通过瓣膜进入主动脉的流动问题。这种研究相当复杂，除研究流体力学外，还要研究血液流变学，了解血液与血管内壁和人工材料相互作用的情况，红细胞力学，细胞膜的应力、应变和破坏，吸血凝块的机理等。这些问题多是知识宝库中的空白领域。生物力学在这方面正发挥或必将发挥更大作用。

生物力学还为提供劳动保护、改善劳动条件服务。在我国，一些生物力学工作者同医学

工作者合作正在对中医手法、推拿等进行研究。此外，假肢、人工关节、轮椅、健身房、各种辅助器械、监护装置等也都是以生物力学为基础研究制造出来的。

5. 生物力学的研究对农业的发展，对提高体育运动水平等也都有重要意义。例如研究植物体内液体的运送，作物通风与呼吸，抗灾能力的提高等都可以为改良品种，改进经营管理提供理论依据。而研究各项体育运动中的力学原理，又可以为刷新体育运动记录提供有益的启示。

以上所述说明，这门新兴学科的研究，对医学科学现代化，对骨科学水平的不断提高，对力学的进一步发展，对工程技术的改进，对保健科学，对发展农业，对体育运动等都有不可忽视的重大意义。由于各学科的互相渗透、相互交叉、紧密结合，又使学科内容不断扩大、深入和丰富，成为人们改变自然，驾驭自然的有效手段。

### 三、生物力学的目标与内容

1981年7月在上海举行的我国第一届生物力学学术会议上，冯元桢教授作了《生物力学新发展》的报告，报告结合国际生物力学发展状况，就生物力学这门学科的目标与内容做了详细论述。他指出，研究生物力学的目标是：探索科学的新奇；增进对生理学与医学的了解；帮助医疗发展与提出防治疾病的方法；降低医疗费用；发展康复工业。生物力学目前研究的内容是：定量生理学；生物组织流变学；液体的流动与平衡；物质的迁移与扩散；微循环；生理学的系统分析；生物控制系统。具体有

心血管循环系统的临床问题：心脏瓣膜的修复，人工瓣膜；心脏的辅助装置，如左心室辅助泵、抗搏器等；体外循环，心肺机；血液的渗流与处理；全心替换；无损伤诊断，脉搏波的分析；湍流的发生及其影响；血管壁物质的交换。

心肺动力学：肺积水与肺不张；手术后的问题；脉动血流的研究；声学与超声波的应用。

外科：损伤与愈合；新的外科手术，如动静脉交替、人工材料的移植等；人工脏器；骨科与整形；牙科。

康复工业：病床与轮椅；健身房；运动器械；假肢；职业安全与健康；公路上和飞行中的安全；老人和聋、哑、盲人辅助器械，日常可用的监护装置。

### 四、生物力学未来发展的关键

冯元桢教授的报告强调了今后生物力学发展的关键问题是：

1. 建立生物材料物质的本构方程。这就象研究弹性力学，需先知道虎克定律，研究流体力学需先知道牛顿定律一样，建立生物材料的物质本构方程是研究生物力学的第一步。目前在一定条件下，对血液、血球、血管、肌肉、骨骼、软骨、一般生物固体、一般生物流体等已得到了一些本构方程，但困难的是确定包含在这些本构方程中的常数。因此，收集数据是至关重要的。

2. 收集物质迁移与扩散的数据。物质的迁移与扩散在生物体中广泛存在。例如，通过呼吸进入肺泡的氧气如何进入血液，最后又如何进入细胞。又如，水如何进入血液、体液，最后达到体液平衡，等等。不研究物质的迁移与扩散，就没有接触到真正的生物问题。目前的困难是缺乏具体数据，特别是血管外的组织更是如此，因为这些组织通常是非均匀的。

3. 寻找生长与应力的关系。这是生物力学中十分重要的课题。最早有人发现骨骼的生长与加一定应力密切相关。例如，在母体中的胎儿，脚的不断踢动对其关节的生长十分有

利。可以这么说，正因为生长与应力密切相关，才使生物力学有了“生命”

总之，生物力学工作者在今后相当长的一段时间内还是要收集生物材料物性的基本数据，建立本构方程；寻求物质迁移与扩散的基本方程与基本数据；搞清生长与应力的基本关系。有了这三方面的基础，再利用力学的传统工具与分析方法，就可得到许多有用的结果。

## 五、生物力学研究的历史和国内外现况

生物力学虽是一门新兴的边缘学科，但却是一个古老的课题，对它的应用和研究有着悠久的历史，中医骨折疗法中就包含着某些朴素的骨伤生物力学原理，它距今约有三千年的历史，一般认为周代中医骨科便初具模型；到隋代，伤科已有较大的发展；唐代的《仙授理伤续断秘方》是我国第一部骨伤科专著；在元代，随着中外医学交流，伤科又得到进一步发展；清代吴谦集历代伤科之大成，著《医宗金鉴、正骨法要旨》等书为中医骨伤科的发展积累了丰富的经验。在仿生学方面，国外有：Galileo对心率测量的贡献；Descartes对眼睛的分析；Borelli对肢干的分析，并测定了人体重心，分析了人体运动；Robert Hooke对细胞的观察；Stephen Hales测量了心脏的弹性；Euler对动脉脉动波的分析；Thomas Young的声音和视觉理论；Helmholtz对发音、视觉和神经生理学理论的贡献；Lamb对动脉管高频波的预言已在实验中得到证实。许多著名生理学家的声誉正是建立在力学研究上。如，Stephen Hales测量出动脉血压与排血量的关系，测量出心脏与主动脉的可膨胀性，并用它来解释主动脉的“平滑”作用是将心脏的脉动流动转变为血管中的平滑流动。他介绍了在血液流动中末稍阻力的概念，并指出这种阻力的主要部位是发生在组织中的微血管内。法国医生Poiseuille对血液流动进行了系统的研究，从而为粘性流体力学奠定了理论基础。Otto Frank阐明了心脏力学。Starling提出了通过生物膜进行质量传递的定律，并阐明了在人体中水分平衡的规律。Krogh以他在微循环力学方面的贡献获得了诺贝尔奖金。1938年，Hill以他在肌肉力学方面的贡献获得了诺贝尔奖金。

在骨生物力学方面，Galileo在1638年首先发现施加载荷与骨形态之间的关系。他谈到，骨的形态与体重及活动有直接关系。Bell在1834年指出骨可以使用来承担载荷。Ward在1839年的报告指出增加压缩载荷可以增加骨的形成。Ludwig在1852年论及重力和肌肉收缩力对维持骨的质量是必要的。1862年，两位德国的研究人员各自独立地报告了加压对骨生长的影响。瑞士教授Herman Von Meyer在1867年的报告指出，骨的内部结构和外部形态一样，与其所承受荷载的大小及方向有直接关系。

1892年，德国医学博士Julius Wolff发表了他著名的《骨转化的定律》。他熟悉Meyer晚期著作所引用的文献及其它早期的骨科学著作，也熟悉瑞士工程师、数学家Culmann所做的模拟股骨的理论分析。这篇著作是他30多年工作中的经验、体会和临床观察的结果，已得到理论和实验的证明。

20世纪初期，由于学科的分化，阻碍了这一学科的进一步发展。后来，体育运动促成了生物运动学的兴起。20世纪中叶以后，医学和生物学家们逐渐认识到，要解决本学科的许多问题必须考虑力的因素。另一方面，力学家们在寻求力学的发展和应用的领域时也注意到生物体是运用力学的广阔天地。正是两者的合作促成了生物力学这门新兴边缘学科的形成。

近年来，生物力学引起人们的广泛注意和研究，发展十分迅速。欧、美、日、苏、澳、

加等国家均建立了专门研究机构，国际学术会议十分频繁。尤其美国生物力学发展较快，在许多大学、附属医院和专门机构中生物力学在基础理论和实际应用的领域中都进行着广泛的研究工作。

国外生物力学研究的特点是：重视学科间的渗透；加强医学与工程学的结合；重视应用，基础理论与实验研究并举。

在我国，生物力学的研究起步较晚，1978年全国力学规划会议根据力学发展的需要，将生物力学作为力学学科性研究工作的一个分支列在力学发展规划纲要中。1979年11月在重庆召开了全国高等学校生物力学座谈会，并邀请Y·C·Fung教授做了生物力学报告。1980年在北京召开了我国第一届生物医学工程学术会议，生物力学作为生物医学工程的内容之一受到普遍重视。从1981年在上海举行的全国第一届生物力学学术会议看，我国生物力学研究工作在深度和广度上发展都较为迅速，在参加这次会议的88个单位。156名代表中，共交流生物固体力学方面的论文33篇，生物流体力学方面的论文39篇。1984年在太原召开了全国第二届生物力学学术会议。在两次大会中间，还分别在西安、石家庄、上海等地举办了生物固体力学和生物流体力学学术讨论会。在不少医学，尤其是骨科学术会议上都有生物力学方面的文章，受到医务工作者，特别是骨科医师的普遍关注。1983年在武汉召开的第一次中、日、美国际生物力学会议上，我国宣读论文10篇，参加交流的论文38篇。1987年又在日本召开了第二次日、美、中国际生物力学会议。

在我国已开始建立一些专门的生物力学研究单位，成立了专业委员会，使我国生物力学的进一步发展有了组织保证。

1980年以来，我国举办了多期生物力学、骨伤生物力学等各种类型的学习班，部分高等院校开设了生物力学课程，并培养了有关方面的研究生，这为我国生物力学的深入发展奠定了良好基础。

## § 1.2 骨生物力学

### 一、骨生物力学概况

力学是研究物体机械运动规律的科学。骨力学可以说是以骨骼为对象，研究骨的机械运动规律的科学。近代力学的特点之一是经典力学与相邻学科的结合，形成了一系列新的边缘学科分支。骨力学便是力学与生物学、生理学、解剖学、临床医学等有关学科结合而成的一门崭新的生物力学分支。骨力学的最终目的是剖析骨和骨骼系统的力学性质，揭示骨骼生长、发育、畸变、衰退和死亡与力作用之间的相互关系，给出生命科学中这类力学问题的精确定量分析，为预防骨损伤、诊断治疗骨科疾患，进行骨矫形、骨移植等提供理论基础。

骨力学的研究内容主要是骨的力学特性，骨的微观结构与宏观力学效应的关系，骨的耦合力学效应，骨的生长与断裂的力学问题以及骨骼生长的控制论等。

骨生物力学与生物力学的其它分支一样，60年代后开始逐步形成。1960年，Curry给出了板层及其形成的详细说明。1974年，Bundy证实，干燥的人股骨的力学性能，是沿股骨的轴向及周向方向变化的。说明骨在力学性能方面既是各向异性，又是非均匀的。1975年，Reilly和Burstein试验了人及牛的股骨，并假定是横向各向同性的。1977年，Knets等做了人胫骨试验。1970年，Lang第一个用超声波确定了骨的弹性模量。1977年，Carter和

Hayes报导了松质骨的弹性模量。骨的非均匀性以及骨的模量随体积密度而变化的发现，推动了一大批研究人员去开展骨组织弹性模量的复合材料模型的探索研究。1980年，Katz假定了哈弗氏骨的一个双层分层纤维增强模型。1964年，Hashin和Rosen给出一个中空圆柱纤维按六方晶系排列的复合材料的有效模量，其结果被用来给出骨组织的总模量。关于骨的粘弹性效应方面，1977年，Carter和Haryes发现松质骨的压缩弹性模量略与应变率有依赖关系。1979年，Lakes, Katz和Sternstein报导了人及牛的皮质骨的扭转实验研究。骨的粘弹性来源尚未确定，它可能与机体材料有关；也可能是由于骨孔隙内流体的影响；或是这些影响与其它影响的综合。

由于多方面原因，许多强度测试结果是变化的。这是由于采用的试件制作方法不同，骨强度是非均匀的，因人、年龄等差别以及随骨的类型而异等。Cowin对具有正交各向异性对称性的材料提出了沿其任何轴的拉伸、压缩及剪切强度的公式，并把Tsai-Wu的唯象强度理论同Reilly和Burstein求出的骨的强度数据相拟合。1970年，Piekariski研究了骨中裂纹的扩展。1978年，Bonfield及其同事也对骨的断裂进行了研究。

在骨对应力的适应性方面，1960年，Currey曾详细描述了骨表面新板层骨片的沉积过程。1964年，Frost对骨表面和内部重建作了区分。1969年，Kazarian等的研究，生动地说明了松质骨的内部重建。1978年，Shumskii等说明了载荷对骨重建的影响。还有不少学者，如Woo、Meade、Liskova和Hert等对此也进行了研究。反馈的两个可能机理也由Cowin和Hegedus作了详细描述。

1979年，Cowin和Van Buskirk阐述了骨表面重建理论。1972年，Martin提出了骨内部重建理论的计算模型。Cowin与其同行还提出了涉及压电效应的表面及内部重建理论。

我国的骨生物力学研究工作与国外先进水平比较虽然还存在一定差距，但从1979年以来，进展还是喜人的。

骨力学方面开展的研究主要有：骨的力学性质研究，人体干骨弯曲强度，骨的粘弹性性质的实验研究，骨在撞击下的动力响应；人颅骨的有限元分析，人颅骨冲击韧度 $\propto h$ 的测定、弹性模量 $E$ 和波松比 $M$ 的实验研究，人头盖骨断裂韧性，下颌骨的受力分析，牙周支持组织三维光弹性应力分析，牙本质及其支持骨组织的弹性模量研究；椎间盘有限元模型，脊柱松质量各向异性、粘弹性的实际研究；人体脊柱的基本数学模型，脊髓打击研究，脊柱的力学性质研究；踝关节的应力分析，髂胫束的生物力学探讨，跟骨骨折的研究，跖骨疲劳骨折的研究，跟骨距的光弹性分析，膝关节的应力场分布，舟骨骨折生物力学分析；人工全髋关节、人工股骨头的研究，人骨的几何性质，椎骨、脊柱的测量技术；关于短跑的分析，人体动作的数学模型，手臂振动响应，手臂机构的动力学研究等。这些成果为骨力学的深入研究和临床应用奠定了基础。

在骨伤、骨愈合与临床研究方面，有骨干骨折断面倾角与骨牵引关系，骨科复位固定器的效应分析，中西医结合治疗股骨骨折的力学探讨；夹板局部外固定的生物力学研究，愈合过程的动物实验与电刺激，脊柱侧凸，颈椎病的发病机制，椎间盘凸出症，头颅损伤，跟骨、舟骨骨折治疗等方面的研究都取得了一定进展。而且可喜的是这些研究都能与骨伤生物力学原理结合，并已在临床上见到成效。在骨折愈合机理方面有的单位也开展了实验研究。所有这些探讨虽然都还是初步的，但已经为骨折愈合、骨移植等的进一步研究打下了基础。

## 二 骨生物力学目前研究的几个问题

骨生物力学研究的问题较广。目前，研究较集中的问题有如下几个方面。

### 1. 骨对应力的适应性

这是生物力学的前沿，“生物力学的灵魂”，“生物力学未来的主题”。正由于此，生物力学才有了生命。所以，有时把生物力学称为生命力学。对该课题的研究还处在初始阶段，研究较多的是骨的生长、愈合与应力的关系。

#### (1) 骨的功能适应性

德国医学博士Wolff于1892年在其著名著作《骨转化的定律》中提出：“骨的功能的每一改变，都按着数学法则，以一定方式改变其内部结构和外部形态”。即骨的外部形态和内部结构反映其功能。活体骨不断进行着生长、加强和再吸收的过程，这个过程总称为骨的“重建”，骨重建的目标是使其内部结构和外表形态适应载荷环境的变化。重建分为表面重建和内部重建。表面重建指的是在骨的外表面上骨材料的再吸收或沉积；内部重建指的是改变骨组织的体积密度时，骨组织内部的再吸收或再加强。

近年来，许多学者对该原理的研究已做了大量工作，并在不断深化。

了解及预言用来控制活体骨的重建性能的应力，不但在骨折临床和矫形等方面有着重要意义，对合理设计接触骨组织的假体器械也特别重要，这些器械包括骨折固定板、外科螺杆、外固定支架以及人工关节等。

实验指出，通过施加轴向或弯曲载荷，可引起动物腿骨的表面重建。Meade等人用一个植入的弹簧系统沿狗股骨轴施加一恒定的压缩载荷表明，横截面积随载荷的增加而增大。Liskova和Herd曾指出，施加在胫骨上的间歇性弯曲，可使骨膜表面向外移动。图1.1表示两根兔胫骨的横截面，左侧受超声理弯曲，右侧是对照肢，相同时间内增加的骨组织用斜线示出。

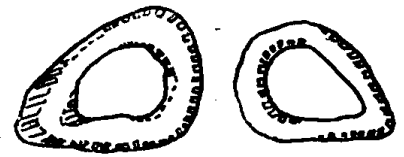


图1.1 两根兔胫骨横截面的比较

临床实践还表明，在年青病人中，如把腓骨移植到胫骨或肱骨部位，被移植的腓骨所承受的应力比处于腓骨位置时受的力要大得多，为适应其新的功能，腓骨将逐渐加粗，使之满足新环境的需要。与此相反，加在骨上的载荷减小，骨形成便减小，骨吸收则增加，如小儿麻痹症，肌肉瘫痪或四肢瘫痪的病人，几乎无肌力时，骨吸收都会明显表现出来。

#### (2) 骨的生长与应力关系

骨的生长与应力的关系是骨力学中的一个重要问题，也是临床应用中很有意义的问题。目前还没有一种可靠的定量分析理论，以及各极限值的确切数据。国内有些单位已注意到这一问题并开始进行动物实验。这一问题的解决似应考虑电磁等耦合效应，因为骨中含有大量的胶原纤维，使骨具有热释电效应，骨中应力的变化会引起电场变化，而电场变化也可能是刺激骨生长的重要因素。对应力场与电磁场的相关性以及物理化学过程的力效应，应给以足够的注意。

Pauwels把骨看成是具有反馈装置的控制系統。在通常情况下，骨所受的机械应力与骨组织之间存在一种生理平衡。在一定的应力情况下，骨质的聚集和再吸收是相互平衡的，骨中应力增加引起骨组织加强，应力减小骨组织发生再吸收现象。即在一定的应力范围内，骨组织的数量与应力值之间存在某一关系，Pauwels用一个三次函数来表示它。

关于骨的重建理论，还有几种不同的力学模型，有代表性的是Cowin的工作。

### (3) 适应其功能的骨结构

在生物学里，骨被描述为一种结缔组织。在力学中，骨被描述为由几种不同固体相和流体相物质构成的一种复合材料。

骨的受力情况虽然颇为复杂，但它总是以最优的外表形态和内部结构适应其功能的需要，以优化的形态和结构为其自身重建的目标。从解剖学上可以见到，凡是强有力肌腱附着的骨骼部分，由于受较大的应力，为适应其功能，骨骼便形成局部隆起，如胫骨髌韧带结节、肱骨三角肌结节等。

研究指出，骨干以其截面形式、密度分布及恰当的骨单元排列来适应其受力状态。关于骨构造的Roux最大-最小原理，已通过力学分析和实验得到了理性的证明。Kimmer从理论上算出来的股骨头三维桁架结构和实际观测结果相当一致。

总之，骨是最理想的等强度优化结构，它不仅在某些不变的承载环境显示其优越性，且在承载变化情况下，通过反馈控制系统，使其无论在几何形态还是内部结构上都做到了与承载环境充分相适应。

## 2. 骨折治疗的研究

目前，骨折治疗一般分为三个基本步骤，即整复、固定和功能锻炼。整复是治疗的首要步骤，是移位的反过程，也是保证愈合好的前提。稳定固定是提高骨折愈合质量的关键，一个好的固定装置，必须能维持复位的效果，使骨折端与器械形成一个几何不变体系，又对骨正常功能所承受的力学状态干扰较小。固定期间正是骨的修复阶段，骨的修复是在一个开放的反馈控制中，按功能适应性理论进行的。骨所处的外部环境将做为一种信息输入反馈系统，不断调整着骨的修复。因此，固定方法和手段必须考虑到骨重建的需要。在骨折治疗过程中，功能锻炼有着广泛意义。它是加速骨折愈合、提高愈合质量的重要措施，对增加血液循环、防止关节粘连、肌肉萎缩、骨质疏松等有着重要意义，并能使骨折断端获得间断性应力刺激。功能锻炼对骨折愈合效果的影响与固定方式有关，良好的固定方式应稳定而较少功能替代。

## 3. 脊柱生物力学

脊柱是人体中的主要受力结构，脊柱的损伤和许多疾患都与它的受力情况相关联。如椎间盘突出与脊柱受的压力及弯矩有关；椎骨骨折与脊柱侧凸等也能用力学解释并指导治疗；对脊柱其它病变和研制治疗脊柱疾病的各种装置等都需了解生物力学知识。

脊柱结构是颇为复杂的。对椎骨、椎间盘、韧带等脊柱元件已作了某些研究，并已得到具有理论意义和临床价值的成果。但关于所有脊柱元件力学特性的研究尚未全面展开。

椎骨力学特性和脊柱疾患的研究在我国正在取得数据和成果。

## 4. 关节生物力学

关节的基本结构包括关节面、关节软骨、关节囊及关节腔等。各个关节的结构、功能虽然不完全一样，但有共同的特性。

(1) 运动灵活性。因需满足活动即功能的要求，一般可做三维方向的伸展和旋转，而且某一运动往往要伴随另外一种或数种运动，所以关节是一种较复杂的空间运动机构。

(2) 摩擦系数小，具有较强的耐磨性。关节软骨有着凹凸不平度约为 $2.75\mu\text{m}$ 的表面，但由于滑液从孔中溢出，大大减小了软骨间的摩擦。测定结果表明，摩擦系数与相对滑动速

度有关，动摩擦系数小于静荷摩擦系数，这不仅有利于关节活动，也有利于维持其相对稳定。在人体生理状态下关节具有最优滑润，应力在 $0.75-2\text{MN}/\text{m}^2$ 时，摩擦系数仅为 $0.0019-0.0025$ ，比冰与冰之间的摩擦系数还小，连最有效的聚四氟乙烯涂层（摩擦系数为 $0.05-0.1$ ）也无与论比。关节软骨经久耐用，几十年、上百年不用更换，这是人工机械难以比拟的。

(3) 关节结构部分不仅有一定的强度、刚度，还有一定的稳定性，以维持其必要的功能活动。维持关节稳定的三个主要因素是：关节面的构造、韧带和周围的有关肌肉。

分析关节运动的关键，首先要了解关节瞬时转动中心，其次要知道肌肉活动的起止点，再求出作用在关节面上的力的大小和方向。

关节软骨紧贴在关节面。从力学角度看它有较强的承压能力，很好的弹性及很小的摩擦系数。其厚度一般在 $2-7\text{mm}$ 之间，呈海绵状结构，含孔率约为 $80\%$ 。它的力学性能如何直接反应关节功能好坏。

软骨的应力松弛很快。Mow认为这是由于承压后滑液流出的结果。Woo对预处理后的关节软骨作单向拉伸应力松弛试验，指出松弛函数依赖于伸长率。

形成骨关节疾病的原因多是由于关节畸形、超出生理状态的载荷和其它环境的影响。这些都属生物力学研究的范畴。所以生物力学可作为分析关节疾病的成因、提出治疗方案和预防措施的有效手段，也是设计关节医疗器械、假体和人工关节的理论依据。

人工关节也是生物力学的研究课题，它的研究已有近百年历史。曾有人以各种材料制造关节，如木片、赛璐珞、银、锌、橡胶、象牙、硝棉胶、镁、脱灰骨、铝等，经过漫长的应用与探讨，到目前只有一部分金属、塑料和陶瓷材料被应用，它们各有优缺点。1960年以来碳质材料开始应用于医学研究。目前，它是最有前途的材料之一。

## 5. 骨骼肌力学

骨骼肌力学的研究，虽不属力学研究对象，但它与骨力学有着难以分割的关系，在此加以概要介绍。

肌肉的力学特性与骨和其它软组织不同。肌肉能使化学能在体温状态下作机械功，并通过自身的主动收缩造成人体的机械运动。人体肌肉有三种类型：骨骼肌、心肌和平滑肌。三者的组织成分相同，收缩的生化机理相近，但在结构、功能和力学性质上有许多差别。肌肉力学的任务就是要认识肌肉收缩的力学规律，建立兴奋状态肌肉的本构关系。

### (1) 骨骼肌的构成和工作原理

骨骼肌、腱和骨共同组成运动器官。骨骼肌的作用是通过自身收缩和骨骼杠杆支架完成人体的功能活动。由于它可按动物意志活动，所以也称随意肌。又由于可观测到横向条纹，也称之为横纹肌。

骨骼肌的收缩机理引起了许多学者的兴趣和研究。1957年，H·E·赫克斯利提出关于肌肉收缩的纤维滑移假说。近年来，不少学者由此出发，把肌肉的力学性能当作肌球蛋白的粗丝和肌动蛋白的细丝之间关系的动力学问题来研究。两者都沿肌肉纤维的纵向，以有规则的重复方式排列。肌肉伸缩时，粗丝的突起部能接触细丝，并产生作用力以便相互滑行，使重叠部分增加，这是肌肉纤维收缩作用力的来源。

如果纤维拉长到超过图1.2 (a) 所示的情况，则不再有突起部分与细丝接触，这时也不再有力；在图1.2 (b) 所示情况下，粗丝的所有突起都与细丝接触，这时，肌肉力达到



最大；缩短超过这个状态时，细丝的顶端超过了粗丝的中点，因所有突起部都拉向中点，这意味着作用于细丝顶端的力的方向妨碍了肌肉继续收缩；粗丝拉着细丝的一部分而推开它的另一部分，从而使净力降低。进一步的缩短将压扁粗丝对着Z线的顶端（图1.2(c)），最终不再有作用力。不考虑由于肌肉覆盖膜的拉长而引起的微小弹性力，纤维有作用力的最大长度几乎是最小长度的3倍。接近这个极限时，作用力变小，故大多数骨骼肌在体内的排列使得正常运动时的长度范围远小于此。

一般工程材料在工作范围内，其抗拉伸的能力随伸长而增加。肌肉与此不同，此现象称为韦伯（Weber）矛盾现象。随年龄增加，这种现象日渐不明显，图1.3给出了肌肉同橡皮的拉力-变形曲线。

(2) 描述骨骼肌力学性质的方程式——Hill方程。

实验指出，在电脉冲刺激下，肌肉将自动收缩产生张力。骨骼肌的特点是，刺激频率越高，产生的张力越大。当频率足够高时（如高于100Hz），张力可能达到最大值，以后不再随频率而变化，这种状态叫挛缩。有关骨骼肌的力学性质实验大都是在挛缩状态下进行的。挛缩时的最大张力 $T_0$ 随固定肌节长度 $L_0$ 而变化。希尔用蛙的缝匠肌进行实验，将试件两端加紧，保持长度为 $L_0$ ，加电刺激使其挛缩产生张力 $F$ ，然后将试样一端松开，肌纤维以速率 $v$ 缩短，张力 $T$ 也随之降低。根据测量，希尔得到如下经验关系：

$$(a + T)(v + b) = b(T_0 + a)$$

这就是著名的Hill方程。式中 $a$ 、 $b$ 、 $T$ 为独立参数； $T_0$ 强烈地依赖于 $L_0$ 。图1.4给出了此方程描绘的曲线与实验结果的比较，可看到两者较为一致。

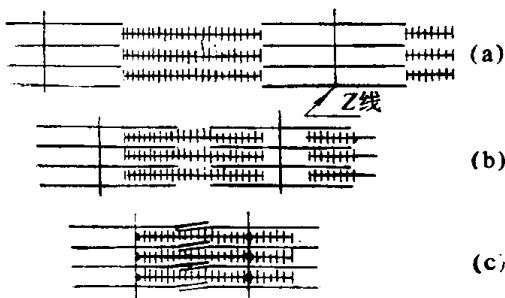


图1.2 排列在脊椎动物横纹肌中的细丝

(a) 纤维非常舒张；(b) 长度中等；(c) 极度收缩

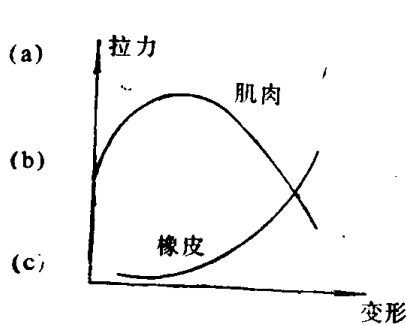


图1.3 肌肉与橡皮的拉力-变形曲线

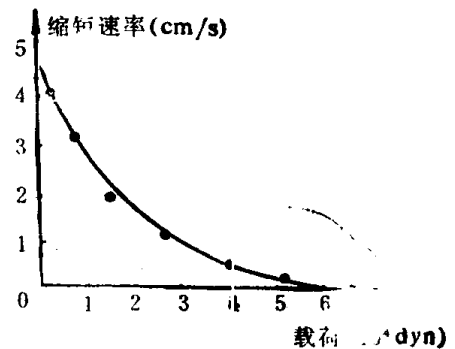


图1.4 Hill方程与实验数据比较

Hill方程也可写为：

$$v = b \frac{T_0 - T}{T + a}$$

或

$$\frac{T}{T_0} = \frac{1 - \frac{v}{v_0}}{1 + c \frac{v}{v_0}}$$

式中， $c = \frac{T_0}{a}$ 。