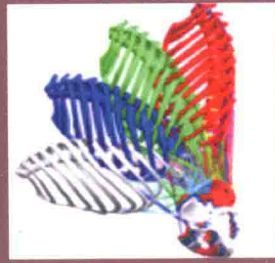
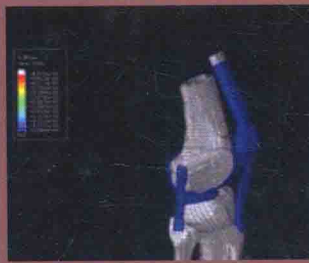
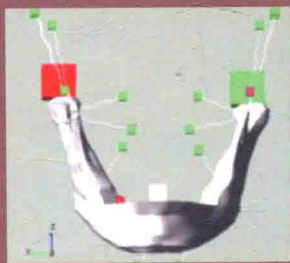
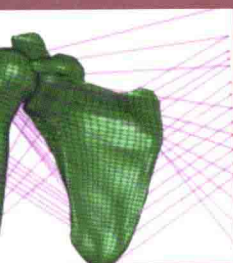




# 人体骨肌系统生物力学

王成焄 王冬梅 白雪岭 等著  
王建平 唐 刚



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 人体骨肌系统生物力学

王成焘 王冬梅 白雪岭 等 著  
王建平 唐 刚

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书阐述人体骨肌系统生物力学仿真建模方法及相关分析模型。作者对中国青年男性和老年女性进行步行、慢跑、上/下楼梯、下蹲、下跪、盘腿坐等生活行为的运动测量,利用该模型对人体头部、脊柱、上肢、下肢典型运动进行运动学和动力学分析,介绍人体肌肉力计算的原理和骨肌力学中常用的有限元计算方法,对上述典型运动进行相关计算,并介绍人体骨肌力学研究中可采用的试验方法及开展的多种试验。本书为作者承担的国家自然科学基金生命学部重点课题“中国力学虚拟人”的研究成果,重点介绍在临床医学中的应用。

本书可供从事人体骨肌生物力学研究的科研人员参考,特别适合作为相关专业本科生和研究生的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

人体骨肌系统生物力学/王成焘等著. —北京:科学出版社,2015.9  
ISBN 978-7-03-045642-7

I. ①人… II. ①王… III. ①肌肉骨骼系统-生物力学-研究  
IV. ①R322.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 215474 号

---

责任编辑:刘宝莉 孙 芳 / 责任校对:郭瑞芝  
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015年9月第一版 开本:720×1000 1/16

2015年9月第一次印刷 印张:39

字数:767 000

定价:198.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 序 一

“满眼生机转化钧，天工人巧日争新。”2001年第174次香山科学会议以“中国数字化虚拟人体的科技问题”为主题，拉开了我国数字人研究的序幕。当年，虽然已知美韩等国已经开展了这方面的工作，但我国对该不该和能不能开展数字人研究尚心中无数，属摸着石头过河式的探索。而到2003年第208次香山科学会议前，我国已经是国际上第三个拥有本国数字化人体数据集的国家，故又以“中国数字化虚拟人体研究的发展与应用”为主题，以图把数字人研究推向发展与应用，特别是在与人有关的医学领域，展开数字医学研究。

“浓绿万枝红一点，动人春色不须多。”中国数字人的研究成果，不仅为垂老迟暮的解剖学注入勃勃生机，使之萌发出数字解剖学新枝，还为临床医学研究提供了新的思路和条件，如利用人体数据集的心血管系统数据建立了全身心血管系统数字模型，利用消化系统数据建立了全身消化系统数字模型等，并在此基础上开展各自领域的研究工作。上海交通大学王成焘教授在国内力学界鼎力支持下，利用中国数字人数据集建立了全身骨肌系统解剖数据模型，并将其转化为骨肌系统生物力学仿真分析模型，定名为“中国力学虚拟人”，得到国家自然科学基金重点项目的支持。在2006~2009年四年间，王成焘教授组织了强大的科研团队开展这项研究工作，邀请我和国内外10名专家组成一个国际指导委员会，汇集了专家们的建议，使这项工作获得了国内外同行广泛的认可，圆满地完成了该项基金项目，取得了优异的工作成绩。

“小荷才露尖尖角，早有蜻蜓立上头。”王成焘教授的学术团队在完成国家自然科学基金“中国力学虚拟人研究”项目的基础上，及时编撰了学术著作《人体骨肌系统生物力学》，详述在中国数字人研究基础上开展的人体骨肌系统生物力学研究工作，并对之进行完整的总结和理论提升，我认为这是非常有意义的。作为数字人技术和数字医学研究发展的重要风向标，该部学术著作是标志我国由“数字人研究”向着产生社会效益的“数字医学研究”发展的里程碑，也能为目前数字医学领域中发展得最快的“数字骨科学”提供创新发展的理论依据。

“敢为常语谈何易，百炼工纯始自然。”值此著作即将出版之际，受王成焘教授之邀欣然此序以庆贺，并向王成焘教授及其学术团队表示深深的谢意。“单丝不

成线,独木不成林”,希望中国数字人研究和数字医学研究取得更多可喜的成果,撰写出更多的科学著作。

中国工程院资深院士

鍾世鎮

2012年初秋

## 序 二

信息科学的进步,特别是计算机科学与技术的快速发展,推动人类社会进入了数字化时代。纵观科学发展史,科学技术的最新研究成果往往最先应用于医学和军事领域。数字医学就是人类社会进入数字化时代应运而生的新生事物,它是在现代医学和数字化高新技术相结合的基础上,涵盖了医学、计算机科学、数学、信息学、电子学、机械工程学等多领域的一门新兴的交叉学科。凡是应用现代数字化信息技术阐明医学现象、探讨医学机理、揭示医学本质、解决医学问题、提高人类健康水平的理论研究和实践应用,都属于数字医学的范畴。数字化人体是将人体结构和功能数字化,在计算机上建立可视可控的人体结构与功能的数字化系统,它为数字医学的基础研究与临床应用提供了基础平台。

美、英、日、德、法、韩等发达国家凭借技术优势,在数字医学领域抢占先机,目前,高端的影像、手术导航等临床诊疗设备大多来自国外发达国家,临床技能模拟培训的高端产品也大多来自国外。除了数字化医疗设备的研发外,在数字医学的基础研究和临床应用方面,国外的发展也非常迅速。以数字医学的人体结构基础——数字化人体的研究为例,自1994年以来,以美国为主导,开展了人体模型、人体信息的数字化计划,相继有可视人计划(Visible Human Project, VHP)、虚拟人计划(Virtual Human Project, VHP II)。后来,美国科学家联盟(FAS)又将人类基因组计划(Human Genome Project, HGP)及人类脑计划(Human Brain Project, HBP)等包括在一起,组成了庞大的数字人(The Digital Human)计划、虚拟生理人计划(Physiome Project)。德国的Voxel-Man研究计划投入巨大。在临床应用中,美国纽约大学复杂头部连体婴儿的成功分离就是数字医学理论、方法和技术在临床实践中应用的典型案例。由于需求牵引和已有了较好的基础理论研究和临床实践应用的基础,发达国家纷纷给予立项资助,包括成立相应的学术组织,并开展了非常活跃的学术活动。

我国数字医学的发展虽然起步稍晚于国外发达国家,但近年来发展迅速。自2001年召开第174次香山科学会议后,我国数字医学的基础研究得到迅速开展。由中国人民解放军第三军医大学和南方医科大学共同完成的“中国数字化人体数据集的建立”项目2007年获得国家科技进步二等奖。如今,由多学科专家参与的数字医学基础研究、应用基础研究和开发应用研究及以临床专家为主体的临床应用研究也已经在全国范围内蓬勃开展,研究态势方兴未艾。经中华医学会、中国科学技术协会和国家民政部批准,“中华医学会数字医学分会”于2011年5月21

日在中国人民解放军第三军医大学正式宣告成立,标志着我国数字医学这一新兴交叉学科的正式诞生。王成焘教授是该学会的创始人之一。

2003年9月,以“中国数字化虚拟人体研究的发展与应用”为主题,举行了第208次香山科学会议,决定进一步开展数字物理人和数字生理人研究。上海交通大学王成焘教授等在国家自然科学基金“中国力学虚拟人”重点项目的资助下,提出利用中国数字人体数据集建立全身骨肌系统生物力学仿真分析模型,开展“中国力学虚拟人”研究,我们全力支持,提供了一套青年男性数字人全套数据集,派出两位解剖学老师帮助进行建模工作,并参加了王教授组织的国际指导委员会,共同推进这项由国家自然科学基金重点项目支持的课题顺利开展,使数字人研究由数字化可视人向数字化物理人迈进。

在完成国家自然科学基金“中国力学虚拟人”重点项目研究的基础上,王成焘教授团队撰写了这本得到“国家科学技术学术著作出版基金”立项支持的学术著作。我认为这是一项非常有意义的工作,它翔实阐述了在中国数字化可视人体基础上开展的人体骨肌系统生物力学研究工作,是中国数字人研究成果的重要应用和发展。在该书即将出版之际,我很高兴为这本著作作序,支持它的出版,并向王成焘教授和他的团队致以衷心的祝贺!中国数字人的研究成果目前已在多领域广泛运用,相信一定会如第208次香山科学会议所要求的那样,在数字物理人和数字生理人方面出现更多、更好的研究成果,出版更多的科学著作。

中国人民解放军第三军医大学副校长



2012年10月2日

## 前 言

在人体运动过程中,发生于骨肌系统内部的力学信息是很多领域基础研究的重要组成部分。王成焘教授及其团队自1984年起和医学界合作,开展了长达25年的骨肌系统生物力学及其临床应用方面的研究。有关“个性化人工关节CAD\CAM技术及计算机辅助临床工程系统”科研成果获2004年国家科技进步奖二等奖。2009年,进一步主持国家自然科学基金重大国际合作项目“亚洲人种髌、膝关节基本特征研究与人工髌、膝关节基本设计”课题研究。通过多年的研究工作,发现医学界的需求带有很大的重复性,通常都是提供各自的医学影像数据,重复地建立骨肌系统模型进行类似的力学计算,耗费很多本来可用于深入研究的精力。于是产生一种思想,即建立一副中国标准人体的骨肌系统生物力学仿真模型体系,它可以改造为科研命题需要的力学仿真模型;可以仿真人体的各种行为运动,做运动学、动力学及肌肉力计算分析;可在此基础上做骨骼的应力分析和关节的摩擦学分析,从而建立一个工作平台,支撑各领域的研究工作。这一创意得到国家自然科学基金的支持,被列为2006~2009年生命学部的重点项目。本书正是该项目研究工作及作者团队多年研究工作的总结,希望能在人体骨肌系统生物力学研究领域发挥一定的学术作用,成为相关研究人员、骨科医生,特别是青年学者和研究生的重要参考用书。

全书共11章,由王成焘教授、王冬梅副教授组织中国力学虚拟人研究团队共同撰写,并对全书结构作出设计,所有作者都是相关章节的研究生或博士后,现已在研究部门或大专院校工作。具体写作分工如下:第1章由王成焘教授撰写;第2章由白雪岭、魏高峰博士撰写;第3章由白雪岭、唐刚、韦山博士撰写;第4章由唐刚博士撰写,其中,4.5.1节和4.5.2节特请上海交通大学长期从事肌肉力学机理研究的殷跃红教授撰写;第5章由王冬梅副教授撰写;第6章由铁瑛副教授撰写,王冬梅副教授作了后续工作补充;第7章由聂文忠副教授撰写;第8章由张琳琳博士撰写,上海交通大学医学院附属仁济医院骨科周健副教授合作开展了医学领域相关研究工作;第9章由王成焘教授和季文婷博士撰写;第10章由汪方副主任医师和石柱方硕士撰写,汪方医生在上海交通大学做博士后研究工作期间,与陈博、张宁华医师投入了大量精力开展骨盆领域课题研究和书稿撰写工作;第11章由王建平副教授撰写,中国人民解放军第二军医大学附属长征医院吴海山教授及其团队投入大量精力合作开展了相关的医学试验研究,华子恺副教授撰写了其中人体髌关节有限元接触计算部分,王成焘教授对全章进行了整理。在项目进展过程



中,叶铭博士组织了中国人民解放军第三军医大学提供的人体样本数据处理和建模工作,开发了相关软件,为后续的研究工作奠定了重要基础。一批已毕业的研究生虽然没有直接参加本书的撰写工作,但他们在中国力学虚拟人课题中的研究工作成为本书的重要内容,他们是:王洪生、崔雯、刘宗亮、李云婷、胡研、刘小丹硕士,张希安、曾祥生博士,以及早年毕业的尚鹏博士等。在这里一并表示衷心的感谢。还要感谢周海宇博士,他贡献了关于关节软骨的部分研究成果,并为全书的规范化付出了辛勤的劳动。

“中国力学虚拟人”课题得到了中国人民解放军第三军医大学和张绍祥副校长的大力支持,不仅提供了整套数字虚拟人样本数据,而且派人指导数据的使用和人体建模工作,在此表示深深的感谢。

在“中国力学虚拟人”项目进展中,成立了国内外专家组成的专家委员会,先后召开了两次研讨会,接受专家的指导,他们是:戴尅戎院士、钟世镇院士、阮雪瑜院士、顾玉东院士、张绍祥教授、龙勉教授、樊瑜波教授、张明教授、欧阳钧教授、孟光教授、高忠华教授、Prof. Christopher Nester(英国)、Prof. Gordon Clapworthy(英国)、Prof. Han-Sung Kim(韩国)、Prof. Marco Viceconti(意大利)、Prof. Savio Woo(美国)、Prof. David Howard(英国)。在本书出版之际,向多年来支持与指导“中国力学虚拟人”研究工作的专家委员会国内外学者表示深切的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

# 目 录

序一

序二

前言

第 1 章 总论 .....	1
1.1 人体骨肌系统 .....	1
1.2 人体骨肌生物力学基本概念与科学问题 .....	16
1.3 人体骨肌生物力学研究方法 .....	18
1.4 中国骨肌力学虚拟人 .....	29
1.5 人体骨肌生物力学的应用 .....	34
参考文献 .....	48
第 2 章 人体几何学测量与仿真建模 .....	50
2.1 概论 .....	50
2.2 人体几何学测量 .....	52
2.3 人体骨肌系统三维几何建模的数据来源 .....	74
2.4 基于冷冻切片数据的人体骨肌系统三维几何建模 .....	75
2.5 基于医学影像数据的人体骨肌系统三维几何建模 .....	89
2.6 中国人体的解剖学统计测量 .....	94
参考文献 .....	98
第 3 章 人体运动测量与仿真分析 .....	100
3.1 概论 .....	100
3.2 人体运动测量内容与设备 .....	106
3.3 运动测量与仿真分析 .....	115
3.4 中国人体下肢典型行为运动测量与分析 .....	124
参考文献 .....	146
第 4 章 人体骨肌动力学仿真建模与计算分析 .....	149
4.1 概论 .....	149
4.2 人体骨肌动力学仿真计算原理 .....	150
4.3 人体骨肌动力学仿真计算模型 .....	157
4.4 人体力测量 .....	166
4.5 肌肉力与肌电信号 .....	171

4.6	人体多刚体动力学仿真计算 .....	183
4.7	人体肌肉力计算分析 .....	196
	参考文献 .....	211
<b>第5章</b>	<b>骨骼与软组织的有限元建模与应力分析 .....</b>	<b>215</b>
5.1	概论 .....	215
5.2	人体骨肌系统的有限元计算模型 .....	216
5.3	骨肌系统有限元计算中的非线性问题 .....	236
5.4	基于 Micro-CT 的骨骼微有限元建模与应力分析 .....	239
5.5	软组织的有限元分析 .....	241
5.6	人体骨肌系统有限元模型的验证 .....	246
5.7	应力-骨重建数值模拟 .....	248
	参考文献 .....	262
<b>第6章</b>	<b>颅颌骨肌生物力学仿真建模与分析 .....</b>	<b>267</b>
6.1	概论 .....	267
6.2	颅颌骨肌系统解剖结构及其力学功能 .....	267
6.3	颅颌骨肌系统几何与动力学仿真建模 .....	273
6.4	颅颌骨肌系统运动学和动力学仿真分析 .....	281
6.5	颅颌骨有限元建模与计算分析 .....	293
6.6	颅颌骨肌系统生物力学实验 .....	301
6.7	颅颌骨肌系统临床医学中的若干生物力学问题 .....	304
	参考文献 .....	323
<b>第7章</b>	<b>脊柱骨肌生物力学仿真建模与分析 .....</b>	<b>328</b>
7.1	概论 .....	328
7.2	脊柱骨肌系统解剖结构及其力学功能 .....	328
7.3	脊柱骨肌系统几何与动力学仿真建模 .....	332
7.4	脊柱骨肌系统运动学和动力学仿真计算与分析 .....	336
7.5	脊柱骨肌系统有限元建模与计算分析 .....	344
7.6	脊柱骨肌系统临床医学中的若干生物力学问题 .....	361
	参考文献 .....	380
<b>第8章</b>	<b>上肢骨肌系统生物力学建模与仿真分析 .....</b>	<b>384</b>
8.1	概论 .....	384
8.2	上肢骨肌系统解剖结构及其力学功能 .....	386
8.3	上肢骨肌系统几何与动力学仿真建模 .....	391
8.4	上肢骨肌系统运动学和动力学仿真计算与分析 .....	397
8.5	上肢骨骼有限元建模与计算分析 .....	411

8.6	上肢实验生物力学 .....	422
8.7	上肢骨肌系统临床医学中的若干生物力学问题 .....	426
	参考文献 .....	430
<b>第9章</b>	<b>下肢骨肌生物力学仿真建模与分析 .....</b>	<b>437</b>
9.1	概论 .....	437
9.2	下肢骨肌系统解剖结构及其力学功能 .....	440
9.3	下肢骨肌系统几何与动力学仿真建模 .....	453
9.4	下肢骨肌系统运动学与动力学仿真计算与分析 .....	459
9.5	下肢骨骼有限元建模与计算分析 .....	476
9.6	下肢骨肌系统临床医学中的若干生物力学问题 .....	484
	参考文献 .....	493
<b>第10章</b>	<b>骨盆骨肌生物力学仿真建模与分析 .....</b>	<b>499</b>
10.1	概论 .....	499
10.2	骨盆骨肌系统几何与动力学仿真建模 .....	499
10.3	骨盆生物力学仿真计算与分析 .....	503
10.4	骨盆骨肌系统生物力学实验 .....	520
10.5	骨盆骨肌系统临床医学中的若干生物力学问题 .....	526
	参考文献 .....	539
<b>第11章</b>	<b>髌、膝关节骨肌生物力学仿真建模与分析 .....</b>	<b>541</b>
11.1	髌关节骨肌生物力学研究历史与现状 .....	541
11.2	髌关节骨肌系统解剖结构及其力学功能 .....	543
11.3	人工髌关节生物力学仿真建模与分析 .....	544
11.4	膝关节骨肌生物力学研究历史与现状 .....	550
11.5	膝关节骨肌系统解剖结构及其力学功能 .....	555
11.6	膝关节骨肌系统生物力学仿真建模 .....	561
11.7	膝关节生物力学仿真计算与分析 .....	569
11.8	人工膝关节设计的生物力学仿真分析 .....	573
11.9	天然与人工膝关节生物力学试验 .....	579
	参考文献 .....	593
	索引 .....	606

# 第1章 总 论

英文“musculoskeletal system”可直译为“肌骨系统”，本书按人体“以骨为干，附之以肌”的理念，将该系统定名为骨肌系统，将涉及该系统的生物力学定名为骨肌生物力学(musculoskeletal system biomechanics)，简称骨肌力学。作为全书的共性基础，本章对人体骨肌系统的基本组成、所存在的生物力学问题及其研究方法进行了综述。本书主要内容来自国家自然科学基金重点项目“中国力学虚拟人”的研究成果，为此本章对中国人种和民族特性、“中国力学虚拟人”项目立项依据和研究内容作了纲要性介绍；最后，根据“中国力学虚拟人”项目研究成果的应用情况，结合作者的体会，对人体骨肌生物力学的应用领域进行了归纳。

## 1.1 人体骨肌系统

人体骨肌系统由骨、关节、肌肉、肌腱与韧带、软骨等组织共同构成，它们具有不同的组织构造、力学性质和功能。

### 1.1.1 人体骨骼系统

骨骼系统是骨肌系统的主干。图 1.1(a)为人体的全身骨骼系统，由 206 块骨组成。按骨所在人体部位归纳为四类，即颅骨、躯干骨、上肢骨和下肢骨。按骨的几何形态分为四类，即长骨(如肱骨、股骨)[图 1.1(b)]、扁骨(如颅骨、肩胛骨)[图 1.1(c)]、粒状骨(如髌骨)[图 1.1(d)]、不规则骨(如椎骨)[图 1.1(e)]。

#### 1. 骨骼的功能

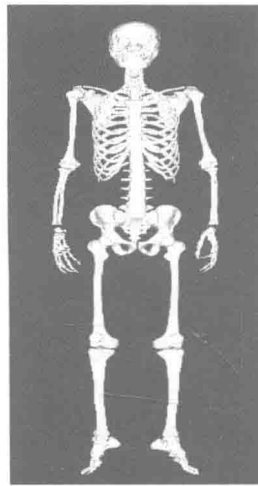
骨骼具有如下四个主要功能：

(1) 为人体塑形，为人体组织和器官提供支持与保护，是外力的主要承受者。

(2) 与肌肉等组织结合，在大脑与神经系统支配下，形成人体行为运动，产生人体对外界的作用力。

(3) 在某些骨骼的红骨髓内生成不同类型的血细胞，是人体内部的造血机构。

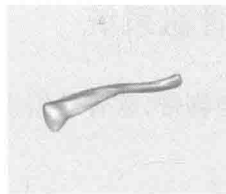
(4) 是人体钙、磷等矿物质的储存点，在人体缺少这些元素时，骨骼将及时予以释放补充，但长期过多的消耗将导致人体缺钙和磷，引发骨质疏松，必须通过外界补充加以恢复。



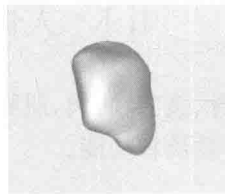
(a) 全身骨骼系统



(b) 长骨



(c) 扁骨



(d) 粒状骨



(e) 不规则骨

图 1.1 人体骨骼

## 2. 骨骼的构造

骨骼由骨膜、骨质和骨髓三部分构成,如图 1.2 所示<sup>[1,2]</sup>。

(1) 骨膜。覆盖在骨的表面,内含血管和神经,有骨外膜和骨内膜之分。骨膜具有成骨的功能,对骨的营养、生长和再生有重要作用,是骨疼痛感的感生部位。

(2) 骨质。是骨的基本组织,形成骨骼本体,有骨密质和骨松质两种。骨密质形成所有骨骼表层坚硬外壳和长骨的骨干,构成皮质骨。骨松质存在于皮质骨构成的空间中,骨组织长成一根根小梁骨,构成空间网格结构,网孔中充满红骨髓,构成松质骨。皮质骨和松质骨共同组成骨骼既轻又有承载功能的力学构造。

(3) 骨髓。分黄骨髓和红骨髓,是人体最大的造血器官。红骨髓分布在松质骨中,造血功能活跃。黄骨髓处于骨髓腔内,仅有少量血细胞保持造血的潜能,当肌体需要时随时可以转变为红骨髓进行造血。

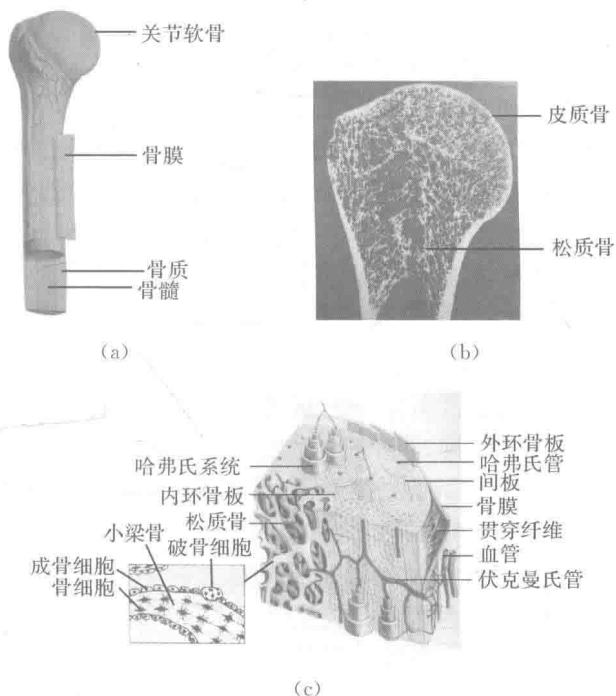


图 1.2 骨骼的构造<sup>[1,2]</sup>

### 3. 骨组织的构成

皮质骨、松质骨中的小梁骨都由骨组织构成。骨组织由骨细胞、成骨细胞、破骨细胞、骨原细胞等细胞和细胞外骨基质组成。细胞构成骨的生命活性，细胞外骨基质构成骨的结构形态和力学性能。成熟骨组织的基本构造为骨基质组成的骨板和生长在其中的骨细胞。只有骨细胞存在于骨板内或骨板的夹层中，其他三种细胞均位于骨板的边缘[图 1.3(a)]。

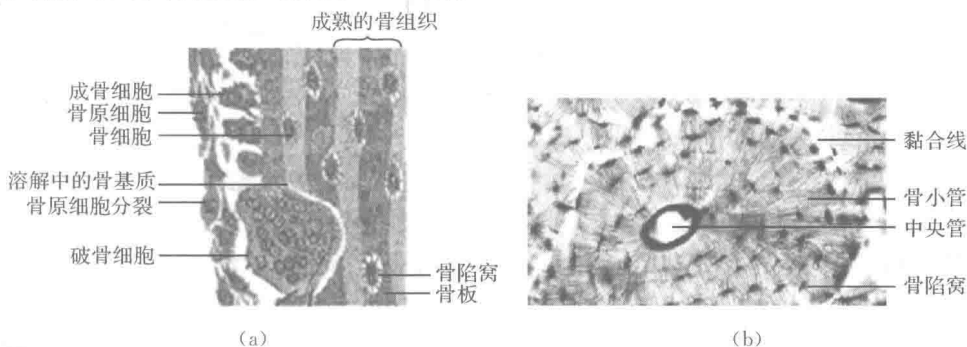


图 1.3 骨组织的构造

### 1) 骨细胞与骨基质

骨细胞是维持成熟骨新陈代谢的主要细胞,胞体较小,呈扁椭圆形,向外伸出许多细长突起,与相邻的骨细胞突起相连,共同生存于细胞外骨基质构成的环境中。骨基质形成的椭圆形小腔称为骨陷窝,容纳骨细胞胞体。相邻的骨陷窝借骨小管彼此通连,成为骨细胞突起相连的通道[图 1.3(b)]。骨陷窝和骨小管内含组织液、可营养骨细胞和输送代谢产物。骨基质由有机成分和无机成分两部分组成。有机成分包括大量胶原纤维和无定形纤维间基质:胶原纤维主要成分是 I 型胶原蛋白;无定形基质呈凝胶状,主要成分是蛋白多糖及其复合物,具有黏合纤维的作用。有机质使骨具有韧性。无机成分又称骨盐,以钙、磷元素为主,也包含其他多种元素。骨盐的存在形式主要为羟基磷灰石结晶,呈细针状,长为 10~20nm,沿胶原纤维长轴规则排列并与之紧密结合。骨盐有序地排列沉积过程称为钙化。骨基质在最初形成时并无骨盐沉积,称类骨质,类骨质经钙化后才转变为坚硬的骨基质,是骨组织成熟的标志。有机质和无机质的这种结合使骨质既坚硬又有韧性。成熟骨组织的骨基质均以骨板的形式存在,层层相叠,骨细胞夹在相邻两层骨板间或分散排列于骨板内。同层骨板内的纤维相互平行,相邻骨板的纤维则相互垂直,这种结构形式有效地增强了骨的强度。骨板与骨细胞在长骨干、扁骨和短骨的表层构成皮质骨,在松质骨中构成小梁骨。

### 2) 成骨细胞

成骨细胞是具有细小突起的细胞,其突起常伸入骨质表层的骨小管内,与表层骨细胞的突起形成连接。成骨细胞向周围分泌胶原纤维和纤维间基质,将自身包埋于其中,形成类骨质,同时向类骨质中释放一种含钙和羟基磷灰石结晶的基质小泡,使类骨质钙化。当新骨基质钙化后,成骨细胞被包埋在其中,合成活动停止,成骨细胞转化为成熟的骨细胞,一层新的成熟骨组织就此形成。

### 3) 破骨细胞

主要分布在骨组织表面,数量较少。破骨细胞是一种多核大细胞,直径约 100 $\mu\text{m}$ ,含有 2~50 个核。其细胞膜紧贴于骨基质表面,形成一道环形胞质围墙,使所包围的区域成为封闭的微环境区。破骨细胞功能活跃时,向此区释放多种酶及酸,在其作用下使骨基质溶解。破骨细胞与成骨细胞的协同作用是骨改建和骨重建的重要机制。

### 4) 骨原细胞

骨原细胞又称骨祖细胞,是骨组织中的干细胞,位于骨外膜及骨内膜贴近骨侧。当骨组织生长或改建时,骨原细胞能分裂,分化为成骨细胞。



#### 4. 皮质骨与松质骨的构造

##### 1) 皮质骨

皮质骨以长干骨为典型[图 1.2(c)]。骨干的外层和内层分别是多层骨板组成的外周骨板和内周骨板。骨板基质中的胶原纤维沿骨干轴向呈螺旋状排列,相邻两层骨板之间的纤维方向相互正交。外周骨板较厚,与骨膜结合的界面中分布有成骨细胞,通过它转化为骨细胞和新骨板层,使骨干生长增粗,即所谓的骨膜成骨机制。内周骨板较薄,表面分布有破骨细胞,可吸收骨基质使骨的髓腔扩大,与外周骨板骨膜成骨机制配合,形成骨的径向生长。在内、外两层骨板间充满沿骨干轴向生长的哈弗氏管,其内为一根毛细血管,周围包绕着多层骨板,构成哈弗氏系统。每层骨板内的骨细胞突起通过骨小管相连,最后与中央微血管沟通,形成骨细胞的生命通道[图 1.3(b)]。每层骨板内的胶原纤维同样呈螺旋走向,相邻层纤维彼此正交。哈弗氏管中的微血管通过福克曼氏管与外界沟通,形成骨的完整血供系统。内、外周骨板和哈弗氏系统之间的空隙中充满一种间质骨板,实际上是一种未完成转化的中间成分。

##### 2) 松质骨

松质骨的基本结构单元是针状或片状小梁骨,其可视为是骨皮质的延伸部分,构成多孔网架结构。每一根小梁骨由数层平行排列的骨板和骨细胞构成[图 1.2(c)],厚度一般为 0.1~0.4mm。表层骨板的骨小管开口于骨髓腔,骨细胞从中获得营养并排出代谢产物。小梁骨表面分布着成骨细胞和破骨细胞,通过两者之间的协调保持松质骨的稳定状态。当破骨细胞作用增强时,松质骨的密度将降低,导致骨质疏松。人工关节柄、接骨板螺钉等 mainly 与松质骨接触。

### 1.1.2 关节与骨连接

人体各块骨骼通过连接构成完整的骨骼系统。在解剖学中,把骨与骨之间的连接部位统称关节,它们进一步可分为运动关节、局部活动关节、微动关节与固定关节四类<sup>[3]</sup>。

#### 1. 运动关节

运动关节的活动度大,通过关节的运动可构成人体某一部位的行为运动。

为定义关节运动,建立以图 1.4(a)所示正面标准站立相为基准的人体参考坐标,包括冠状面、矢状面、横断面三个基准面,以及冠状轴(X轴)、矢状轴(Y轴)、垂直轴(Z轴)三个坐标轴。

人体的运动可定义为如下四类[图 1.4(b)~(e)]:

(1) 屈伸运动。肢体或躯干运动中两正面相互接近、角度变小时称为屈,相反