

主编 Brian R. MacIntosh Phillip F. Gardiner Alan J. McComas

骨骼肌

结构与功能

SKELETAL MUSCLE
Form and Function

主译 余志斌 李全 徐彭涛 陈焱 张蓝宁



第四军医大学出版社

骨骼肌

结构与功能

SKELETAL MUSCLE
Form and Function

第 2 版



北京协和医学院出版社

骨骼肌

结构与功能

SKELETAL MUSCLE

Form and Function

主 译 余志斌 李 全 徐彭涛
陈 焱 张蓝宁

译 者 (按姓氏笔画排序)

马孝武 王云英 圣娟娟
余 愿 余志斌 宋 振
张 琳 张蓝宁 李 全
杨 宁 陈 焱 徐彭涛
高 放 常 惠

学术秘书 杨 宁

图书在版编目(CIP)数据

骨骼肌:结构与功能/(加)麦金(MacIntosh, B.R.), (加)加德纳(Gardiner, P. F.), (加)麦克马斯(McComas, A.J.)主编;余志斌等主译. —西安:第四军医大学出版社, 2010.2

书名原文:Skeletal Muscle-Form and Function

ISBN 978-7-81086-747-4

I. 骨… II. ①麦… ②加… ③麦… ④余… III. 肌肉骨骼系统 IV. R322.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 020778 号

版权登记号:图字:军-2009-048 号

Copyright © 2006 by Brian R. MacIntosh, Phillip F. Gardiner, and Alan J. McComas

Copyright © 1996 by Alan J. McComas

All Right Reserved.

本书中文简体字版由第四军医大学出版社出版发行

骨骼肌:结构与功能

主 编 Brian R. MacIntosh Phillip F. Gardiner Alan J. McComas

主 译 余志斌 李 全 徐彭涛 陈 焱 张蓝宁

责任编辑 土丽艳 文 闻

出版发行 第四军医大学出版社

地 址 西安市长乐西路 17 号(邮编:710032)

电 话 029-84776765

传 真 029-84776764

网 址 <http://press.fmmu.sn.cn>

印 刷 西安永惠印务有限公司

版 次 2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

开 本 787×1092 1/16

印 张 29

字 数 700 千字

书 号 ISBN 978-7-81086-747-4/R·654

定 价 99.00 元

(版权所有 盗版必究)

作者简介

Brian R. MacIntosh博士 加拿大Alberta省Calgary大学研究生院副院长, 运动机能学院教授。MacIntosh开展的研究工作处于骨骼肌领域的前沿, 发表研究论文50余篇, 参编多部肌肉与运动生理学专著。他承担本科生与研究生的骨骼肌生理学课程教学25年, 是加拿大运动生理学协会、加拿大生理学会、美国生理学会、美国运动医学联盟、生物物理学会以及人力运动器械委员会会员。他也是加拿大应用生理学杂志的助理编辑, 加拿大运动生理学理事会前任理事。

Phillip F. Gardiner博士 加拿大Manitoba省Manitoba大学的健康、休闲与人体机能研究所主任。他是生理学客座教授, Manitoba大学医学院脊柱研究中心成员, 加拿大研究主席(这一职位只授予具有国际声望的科学家)。Gardiner也是加拿大运动生理学学会的前主席, 《加拿大应用生理学》杂志的前联合主编。他在神经肌接头适应性研究领域发表了大量的研究论文, 编著*Neuromuscular Aspects of Physical Activity*一书。

Alan J. McComas教授 加拿大安大略汉密尔顿McMaster大学神经学荣誉教授。McComas从事神经与肌肉研究40余年, 他的主要研究成就是发明估测人运动单位数量的方法, 阐明生电性钠泵在延迟疲劳方面的重要性, 以及较早开展人肌纤维微电极研究。他拥有荣誉讲师(named lectureships)头衔, 为神经科学学会的会员。

译者序

人体内六百余块骨骼肌占人体近 40% 的体重,不仅在保持人体姿势、运动与呼吸功能中发挥重要作用,而且在形成语言、并通过肢体与面部表情传达情感方面起到无可替代的作用,还能参与体温调节、代谢调节、代谢性疾病的发生与发展、老年化、心理与生理健康等重要过程。骨骼肌的研究不仅在运动医学中具有重要的地位,在骨骼肌遗传疾病与代谢性疾病如糖尿病的研究中,亦发挥着越来越重要的作用。*Skeletal Muscle-Form and Function* 一书是国际骨骼肌研究领域广泛使用的专著之一。发达国家一些著名大学的相关专业选用该书作为本科生的教科书,或者指定该书为初学者必读的参考书。该书最大的特点是将解剖学、生理学、生物物理与生物化学等基础理论与临床应用密切结合,理论阐述系统而研究深入,有助于初学者较快熟悉骨骼肌研究领域的基础理论与基本技术,同时也能对研究生与研究工作者具有参考价值。因此,我们组织了一支专业的翻译队伍对原著进行了翻译。

在翻译过程中,全体参译人员为保证翻译的准确性,反复核对并查阅大量相关教科书与文献,对参译人员付出的艰辛劳动表示衷心的感谢!秘书杨宁同志做了大量的事务性工作,对她默默无闻的奉献,轻轻地道一声:谢谢!另外,中国人民解放军总后勤部优秀人才工作站给予部分经费的资助,在此也表示深深的感谢!

因译者知识与文字水平的局限,翻译的内容难免存在纰漏,敬请读者原谅并不吝赐教。

余志斌

2009 年 12 月

前 言

大约35年前,一位神经生理学家宣称他已“洞悉”神经科学与肌肉科学的全部领域。然而不久,由于知识的爆炸式扩展,曾经系统的科学体系被条块化分割。例如,骨骼肌研究方面的离子通道专家既不知道也不关心收缩的机制;钙离子动力学专家可能完全不熟悉运动神经元放电频率的变化,或者不了解在不同类型肌纤维存在疲劳易感性的差别。同时,与其他基础领域的研究一样,骨骼肌研究也打下了深深的分子生物学的印记。

尽管存在知识的分割,骨骼肌仍是一个迷人的研究领域。机体中没有一个组织能像骨骼肌这样建立了完备的知识体系。正是对骨骼肌及其神经支配的研究,发现了突触机制的第一条线索;揭示了胚胎期程序化神经凋亡与瞬时性神经超支配伴生的现象。仍是对骨骼肌的研究,奠定了细胞间营养性依赖作用的基础。显然,在骨骼肌研究领域,不难列举出许多卓越的发现。

本书力争将大量的信息进行有机的整合,不仅涉及骨骼肌研究的各个方面,而且将这些知识置于合适的部位,并形成内在的逻辑联系。在介绍最新进展的同时,也描述骨骼肌知识体系赖以建立的经典实验。正是这些奠基性与精巧的研究工作,使人们不再为该领域有如此之多的生理学家获得诺贝尔奖而感到惊奇,这些获奖者分别是:Charles Sherrington, Edgar Adrian, A. V. Hill, Andrew Huxley, Alan Hodgkin, Jack Eccles, Bernard Katz, Bert Sakmann与Erwin Neher。

本书详细描述了运动神经元与骨骼肌的结构与功能,为了解骨骼肌提供基础知识体系。大学生、理疗学家与理疗医师、研究生以及肌电图专家均可从中获得运动学方面的最新进展。依据本书可为本领域的学生设置高级班课程,也可作为科学研究者与临床医生开展本领域研究的有价值的参考资料。本书的显著特点是将基础科学——解剖学、生理学、生物物理学与化学知识、临床应用以及其他方面有价值的应用融为一体。

为了方便学习,本书提炼出许多要点置于页边上,并配以大量的图表,其中大部分图为原始图,特别有价值的知识点也用图的形式呈现。书后有术语表,对大量的术语、符号与缩写进行解释。另一个新的特征是每一章最后均有临床应用一节,这部分主要阐述神经或肌肉细胞内的缺陷如何引起临床上的功能紊乱或疾病,至少能让非专业人员了解疾病的名称。如第一章描述了遗传性缺陷导致肌肉缺失关键性蛋白抗肌萎缩蛋白,引起杜兴肌营养不良征。其他的疾病包括Charcot-Marie-Tooth病、恶性高热、Bell肌麻痹、McArdle综合征、家族周期性高钾麻痹、Guillain-Barré综合征以及脊髓侧索硬化征。除疾病外,临床应用中还讨论了生物毒素影响神经肌肉功能的机制,专

门训练引起的肌肉适应,不常见运动方式的影响,以及肌肉内有益的糖原积聚。肌电图在疾病诊断与功能定量方面的作用也在多处进行了叙述。

本书分为三部分,第一部分描述神经肌肉系统的结构与发育,包括肌肉、运动神经元、神经肌接头与感受器,这为学习第二部分肌肉的功能打下基础。第二部分从离子通道与泵开始进行介绍,接着是轴浆运输与兴奋状态下的细胞膜特性。用三章的篇幅描述了运动单位的组织、特征与募集。最后讨论了肌肉的能量代谢,涉及肌肉收缩时的能量消耗与供给能量的途径。第三部分探讨肌肉的适应性,这部分包括疲劳下的急性变化,去神经支配、废用或不活动导致的慢性适应,以及训练对神经肌肉功能的改善作用。神经对肌肉与肌肉对神经的双向营养作用在第十八章进行了专门的讲解。肌肉损伤后的变化与再生修复的特性也有所涉及,最后一章介绍了老龄化骨骼肌功能降低方面的内容。

这是本书的第二版,保留了第一版中基本构架,加入了最新的信息。对第十一、十四与十五章进行了重写。术语表中增添了大量的术语,在每一章第一次出现的术语用斜体标出,在少数章中出现的术语,均已在术语表中给出所在章的编号,以便使读者能迅速找到这些不常用的术语并加深印象。在术语表中亦包括了缩写词。

但愿读者能像我们一样,被骨骼肌研究中的惊人发现激发出求知的渴望。

Brian R. MacIntosh博士

Phillip F. Gardiner博士

Alan J. McComas博士

目 录

第一部分 结构与发育

第一章 肌肉的结构与肌纤维解剖	3
第一节 肌肉的结构	4
第二节 肌肉的结缔组织	7
第三节 基底膜	10
第四节 细胞膜	12
第五节 肌原纤维	14
第六节 管道系统	18
第七节 细胞核与线粒体	19
第八节 临床应用	21
第二章 运动神经元	24
第一节 运动神经元的一般特征	25
第二节 运动神经元胞体	26
第三节 运动神经元细胞骨架蛋白	27
第四节 轴突、树突和神经胶质	30
第五节 临床应用	34
第三章 神经肌肉接头	36
第一节 神经肌接头的一般特征	36
第二节 肌细胞乙酰胆碱受体	38
第三节 神经肌接头处基底膜	41
第四节 轴突末梢	43
第四章 骨骼肌感受器	47
第一节 肌梭	47
第二节 高尔基腱器官	53
第三节 游离神经末梢	55
第四节 运动中骨骼肌感受器的作用	56
第五节 临床应用	56

第五章 肌肉的发育 58

第一节 胚胎期肌肉的发育 58

第二节 出生后肌肉的发育 71

第三节 临床应用 75

第六章 肌肉神经支配的发育 78

第一节 胚胎期的发育 78

第二节 临床应用 90

第二部分 肌肉的功能

第七章 离子通道、泵与结合蛋白 95

第一节 离子通道与泵的性质 95

第二节 钠通道 98

第三节 钠泵($\text{Na}^+\text{-K}^+$ 泵) 101

第四节 钾通道 104

第五节 钙通道 107

第六节 钙结合蛋白 111

第七节 钙泵 113

第八节 阴离子通道 114

第九节 临床应用 116

第八章 轴浆运输 119

第一节 轴浆运输及其分类 119

第二节 临床应用 126

第九章 静息与动作电位 128

第一节 膜静息电位 128

第二节 动作电位 135

第三节 临床应用 143

第十章 神经肌肉递质 148

第一节 乙酰胆碱的释放 149

第二节 突触后事件 154

第三节 临床应用 155

第十一章 骨骼肌收缩 164

第一节 骨骼肌收缩的肌丝滑行理论 164

第二节 骨骼肌的横桥理论 167

第三节 关键性收缩蛋白:肌球蛋白和肌动蛋白 171

第四节 兴奋-收缩耦联 175

第五节	收缩响应	181
第六节	张力的长度依赖(长度-张力关系)	184
第七节	等张收缩	186
第八节	临床应用	187
第十二章	运动单位	190
第一节	运动单位的构成	191
第二节	运动单位的生理学与生物化学性质	199
第三节	运动单位的分类	204
第四节	临床应用	208
第十三章	运动单位的募集	210
第一节	运动单位激活的检测	210
第二节	募集的大小原则	211
第三节	最大自主收缩	219
第四节	临床应用	222
第十四章	肌肉代谢	223
第一节	肌肉收缩需要能量	223
第二节	ATP 的生成	224
第三节	代谢系统的整合	231
第四节	代谢系统的调节	234
第五节	所需能量的数量	236
第六节	临床应用	238

第三部分 神经肌肉系统的可塑性

第十五章	疲劳	243
第一节	疲劳的定义	243
第二节	中枢性疲劳	244
第三节	外周性疲劳	246
第四节	兴奋-收缩耦联障碍	251
第五节	肌纤维内生物化学改变	254
第六节	疲劳后的恢复	262
第七节	临床应用	263
第十六章	肌肉失神经支配	265
第一节	运动轴突与神经肌肉接头的改变	265
第二节	肌纤维的变化	269
第三节	临床应用	274

第十七章 肌肉神经重支配 278

 第一节 神经再生 278

 第二节 侧突神经再支配 280

 第三节 基底膜的作用 283

 第四节 多神经支配的肌纤维 284

 第五节 神经重新支配后肌纤维的变化 286

 第六节 神经再支配后的运动单位特性 288

 第七节 临床应用 290

第十八章 营养作用 293

 第一节 运动神经元对肌肉的作用 293

 第二节 肌肉对运动神经元的作用 300

 第三节 临床应用 305

第十九章 废用 307

 第一节 人体研究 307

 第二节 动物研究 312

 第三节 临床应用 319

第二十章 肌肉训练 321

 第一节 肌肉的强度和功率 321

 第二节 人体耐力训练 327

 第三节 动物的训练研究 330

 第四节 DNA 转录和 RNA 翻译的适应性改变 333

 第五节 临床应用 336

第二十一章 损伤与修复 337

 第一节 肌肉收缩性损伤 338

 第二节 外因引起的肌肉损伤 340

 第三节 临床应用 343

第二十二章 老龄化 346

 第一节 老龄化肌肉变化 346

 第二节 老龄化运动神经元变化 354

 第三节 轴突与神经肌接头的变化 359

 第四节 临床应用 362

术语表 365

参考文献 399



第一部分 结构与发育

组织的结构决定其功能。例如，骨骼肌的功能是产生力或者进行运动。为了有效地产生收缩力，肌纤维内的主要组成为粗、细肌丝构成的收缩单元。因此，本书第一部分将介绍肌丝及其固定分子的特异结构，由此揭示骨骼肌横纹外观的根源。

信号是怎样传导至肌丝，使其产生相互作用而产生力或运动的呢？要了解肌肉的兴奋，首先，需要阐明脊髓运动神经元的结构；其次，我们将介绍神经纤维（轴突）的结构，正是神经纤维才使冲动得以迅速、反复地从神经元胞体传导至神经末梢。在轴突末梢和肌纤维接触的部位有一间隙，称为神经肌肉接头。冲动不是简单地跳过这一间隙，当冲动传导至轴突末梢，引起递质（乙酰胆碱）释放，从而在神经支配的每根肌纤维形成冲动。冲动不仅沿着肌纤维表面传导，而且向细胞深处传导，为所有肌丝提供信号。使兴奋传至肌纤维深部的结构为横管系统或称 T 管系统。T 管与肌纤维内终池形成特殊接触，使得 Ca^{2+} 成为兴奋信号传递通路中的重要成分。因此，在信号传递通路的每一环节，肌纤维与神经纤维的结构都完美地满足了其功能需要。在剖析肌肉结构时，应注意肌细胞与其他组织细胞一样，也具有相同的细胞器组成，如细胞核、线粒体、细胞膜等。研究工具与研究手段日新月异，从上世纪常见的光学显微镜，到干涉显微镜、电子显微镜与激光共聚焦显微镜，再到冰冻切片技术、X 线衍射技术，这些新技术从巨分子与分子水平为我们提供了大量骨骼肌结构方面的知识。

本部分前三章介绍肌纤维、运动神经元与神经肌肉接头的结构,第四章主要介绍肌肉感受器,为方便起见,一并介绍肌肉感受器的生理机能。尽管在对骨骼肌及其神经支配的描述中经常提到感受器,但感受器属运动控制研究的内容,不属本书知识范围。这部分的最后两章(第五章与第六章)阐述肌纤维与运动神经元在胚胎期的发育演化,以及生长中的神经纤维如何与肌纤维建立突触联系,这是目前备受关注的问题。这些问题的解决离不开显微学家熟练的技能,也离不开分子生物学家的帮助。分子生物学家主要负责鉴别肌纤维生长发育时,激活基因的信号分子,并确定这些信号的正确上下游关系。毋庸置疑,将会有更多的信号通路被揭开面纱。当然,目前我们已对发育过程中遗传指令形成与处理有了足够了解。

全书各章均有应用生理学方面的内容,以揭示结构上细微的改变或者异常的胚胎发育是如何导致疾病或者功能失调的。

陈 焱 译

余志斌 校

第一章 肌肉的结构与肌纤维解剖

肌肉产生力使骨骼运动,适应各种功能需求,协助调节体温,并能进行自我修复。通过对运动单位激活速度和程度的自主控制,肌肉可以非常精细地调节力量的大小。机体中每块肌肉都有共同的结构特征,即结缔组织连接肌肉并构成肌肉的外形,多根肌细胞(单个肌细胞亦称肌纤维)形成肌束。每个肌细胞或肌纤维结构复杂,并形成各种功能,如收缩性能、能量供给、蛋白质合成。机体中每块肌肉都有一个血管网,肌纤维可以从中获得氧气和各种产能的化学底物,并将代谢产生的热量和各种化学物质运出肌肉。这个血管网可维持静息状态下肌纤维间质内环境的稳定,使运动对内环境稳态的干扰作用降低到最低程度。肌肉中肌纤维排列方式、神经支配以及单纤维的收缩性能共同决定了肌肉的运动能力。

本章中,首先阐述肌肉的形态和大小,再观察结缔组织对肌纤维的连接作用,这是肌肉的宏观结构。通过光学显微镜和电子显微镜的观察,可对肌腹中成千上万肌纤维中的任一根进行描述。

从观察包裹肌纤维的薄膜开始,再依次探讨肌纤维内的特点。肌纤维各个部分均与收缩运动和收缩力相关联,其实,这都是肌纤维的主要组成成分——肌原纤维的作用(图 1-1)。

传导运动神经元信号激发收缩,以及为肌原纤维产力提供能量的结构,在肌原纤维中所占体积不大,但所起的作用却不小。肌纤维中的两类网状管道系统与信号转导有关,包括:T管(transverse tubules)和肌质网(sarcoplasmic reticulum, SR)。T管能将信号传导至肌纤维内部,以启动收缩;SR

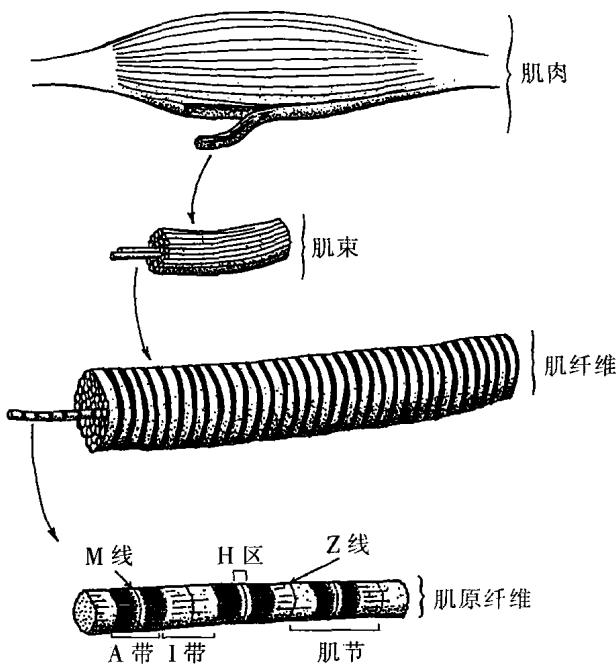


图 1-1 骨骼肌的结构。肌肉由肌束组的,每个肌束被肌束膜分隔(图 1-4)。肌纤维和肌原纤维的外观呈横纹状,由明带与暗带交替排列而成;这些带在同一肌纤维内不同肌原纤维之间和一块肌肉中不同肌纤维之间,均排列在相同的位置

是细胞内的 Ca^{2+} 储存库,SR 的 Ca^{2+} 释放后,就会引发收缩反应,而 Ca^{2+} 被回收到 SR 中使肌纤维舒张。肌纤维中分布着适量的线粒体,它们能够提供 ATP,是肌纤维所有需能过程的能量来源。最后一个重要结构是肌细胞核,通过遗传信息的表达,翻译合成纤维内各种蛋白,包括膜蛋白、肌原纤维、管道系统、细胞质与细胞器的各种蛋白。本章将一一介绍上述结构与细胞器。

第一节 肌肉的结构

和人类一样,对于大部分动物来说,只有不断进化才能够生存下来。众所周知,像步行、跑步、捕猎或者逃跑、呼喊或者耳语、看、听、甚至站立不动,这些人类活动都需要运动来维持,至少需要肌肉收缩。当然,最重要的莫过于维持简单呼吸运动的肌肉收缩。肌肉形态和大小的多样化,反映了肌肉功能的巨大差异性。

要点:与肌肉发挥的功能一样,肌肉本身也具有多样性。

一、肌肉的多样性

1. 肌肉肌纤维数量的多样性。鼓膜张肌具有调节鼓膜张力的作用,它仅由几百根肌纤维组成;站立和跑步时,腓肠肌中起主要作用的肌肉之一——内侧腓肠

肌,则是由几百万根肌纤维构成的。人类部分肌肉中包含的肌纤维数量如表 1-1。

2. 肌肉形态的多样性。一些肌纤维较粗,比如使髋关节进行外展和伸直运动的股直肌或者臀肌。有的肌肉又长又细,如股薄肌和缝匠肌。还有一些肌肉具有很长的肌腱,如手指伸屈肌和脚趾伸屈肌。这种多样性与肌肉需要执行的各种任务相适应。肌肉越长,收缩越短,缩短时的速度就越快;相比之下,肌肉越粗,所能产生的张力就越大。屈指肌的长肌腱在腱鞘(retinacula)内滑动,并且附着于指骨的基底部;通过这种方式,较小的肌腱运动就能使手指产生较大的抓握动作。

表 1-1 人不同肌肉的肌纤维数

肌肉	肌纤维数
第一颞状肌	10.250 ^a
外侧股直肌	27 000
颈阔肌	27 000
第一背侧股间肌	40 500
缝匠肌	128 150 ^a
肱桡肌	129 200 ^a
胫前肌	271 350
内侧腓肠肌	1 033 000

注释:以 50 根肌纤维为最小计数单位,a 为平均值。缝匠肌的数据来自 MacCallum,1989;其余数据来自 Feinstein 等 1955

要点:羽状结构可以在有限的体积内包含更多的肌纤维并产生更大的力。

二、肌纤维的羽状结构

人体的肌纤维可划分为平行纤维(如梭状纤维, fusiform)和羽状纤维。由平行纤维构成的肌肉中,肌纤维与肌腹的纵轴平行(图 1-2),这样单肌纤维的缩短可直接变成肌肉的缩短。人体大多数肌肉的纤维呈梭状(图 1-2)。在一些较大的肌肉中,纤维呈羽毛状附着于肌腱(或者腱膜, aponeurosis)上,故

称为羽状肌纤维(pinnated 或者 pennated)。

与梭状肌相比,羽状肌纤维中收缩力仍沿肌腱轴线方向传导,由于肌纤维与肌腱呈一定角度,故沿肌腱轴线传出力的大小是肌肉纤维与肌腱轴线夹角的余弦值(见“肌肉结构与功能”),即传导(沿着肌腱方向)到肌腱的有效作用力要比收缩时产生的总收缩力小,也就是说,产生同样

大小的收缩力,羽状肌纤维比梭状肌的缩短程度更大。羽状结构的优点是增大肌肉的有效横截面积。相同大小的肌肉中,羽状肌肉较梭状肌腹含有更多的肌纤维。由于肌肉产力大小取决于肌肉中肌纤维横截面积之和,所以羽状肌肉产力会成比例增加。由于肌纤维较短,其缩短距离与速度均减少,从而通过增加横截面积的方式进行补偿。由于羽状肌纤维与肌腱形成夹角(见“肌肉结构与功能”),收缩时,中央的肌腱产生的移动距离会比肌纤维缩短的距离大。这种结构还有一个优点是:使肌纤维工作处于长度-张力曲线的最适范围(Gans Gaunt, 1991; 第 11 章图 11-7),虽然肌纤维缩短距离较小,但产生的力与其他肌纤维较大缩短距离的产力相当。

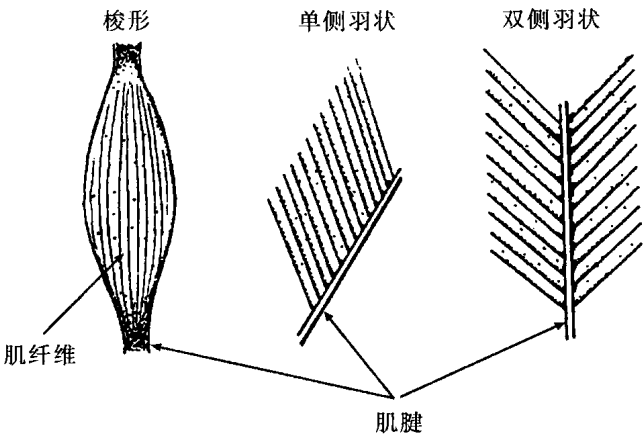


图 1-2 肌纤维的三种不同排列方式。梭状肌肉由锥形肌纤维组成。羽状纤维是平行排列的,但肌纤维排列的方向与肌肉的运动方向并不一致

三、肌肉的横纹

在显微镜下观察肌肉纵切面,发现每一根肌纤维都具有一系列明暗交替的横纹。使用偏振光观察,这些条纹更加明显。任何角度下,所有的明带折光系数都是一致的,这种特性被称为是各向同性,所以明带被命名为 I 带(I-band)。暗带具有各向异性,并被命名为 A 带(A-band)。

在肌原纤维水平,可以观察到更加细致的条带结构(图 1-1 和 1-9)。在 I 带之间是 Z 线或者 Z 盘(Z-line or Z-disk)。A 带之间有一灰白色区域,就是 H 区(H-zone)。M 线(M-region)又将 H 区平分为两半。连续两个 Z 线之间的部分称为肌节(sarcomere)。肌纤维舒张状态下,每个肌节的长度约为 2.2μm。相邻的肌原纤维被肋节(costameres)固定在 Z 线上,这使肌纤维中每一根肌原纤维上的条带横向对齐排列,肌纤维之间也同样对齐排列,这样,骨骼肌就具有了外观上的横纹特征。

肌肉单纤维是由大量的肌节组成的。肌纤维的长度取决于这些肌节的数量。表 1-2 为人的多种单肌纤维肌节数量参考值。在一些较长肌肉中,可以用肌节数量代表其长度。据报道,人类最长的肌纤维长达 12cm。由肌纤维

要点:骨骼肌是一种横纹肌。