

中国体育博士后文丛

骨骼肌损伤 修复与微观化 研究探索



刘 永◎ 著

北京体育大学出版社

中国体育博士后文丛

骨骼肌损伤修复与微观化 研究探索

刘 永 著

北京体育大学出版社

策划编辑:李 飞
责任编辑:赵海宁
审稿编辑:李 飞
责任校对:赵红霞
版式设计:杨 俊

图书在版编目(CIP)数据

骨骼肌损伤修复与微观化研究探索 / 刘永著.
—北京:北京体育大学出版社, 2015.11
ISBN 978-7-5644-2100-7

I. ①骨… II. ①刘… III. ①骨疾病-康复-研究②
肌肉疾病-康复-研究 IV. ①R680.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第279630号

骨骼肌损伤修复与微观化研究探索

刘 永 著

出 版:北京体育大学出版社
地 址:北京市海淀区信息路48号
邮 编:100084
邮 购 部:北京体育大学出版社读者服务部 010-62989432
发 行 部:010-62989320
网 址:www.bsup.cn
印 刷:北京京华虎彩印刷有限公司
开 本:787×960毫米 1/16
成品尺寸:170×228毫米
印 张:11.75

2016年3月第1版第1次印刷

定 价:79.00元

(本书因装订质量不合格本社发行部负责调换)

作者简介

刘永，男，1980年出生于河南临颖，毕业于首都医科大学，医学博士学位，北京体育大学博士后流动站体育学博士后。

现任北京体育大学运动人体科学学院教师，2013—2015年度北京市教委、北京市教委首批“北京市高校青年英才计划”入选者。

现主要从事骨骼肌损伤修复机制相关研究，近5年作为项目负责人主持中国博士后科学基金项目1项，教育部博士点基金课题1项，中央直属高校科研专项经费2项，参与完成国家自然科学基金及北京市自然科学基金多项。

第一作者署名在《European journal of pharmacology》《中国运动医学杂志》《北京体育大学学报》《解剖学杂志》等SCI期刊和国家核心刊物上发表学术论文多篇，参与编写本科生教材《运动解剖学》1部。



前 言

变得更强壮和塑造完美曲线是人类近乎本能的愿望，能够满足这些愿望的是占比接近人体体重一半的骨骼肌。骨骼肌活动是生命活动的原动力，不用说竞技或锻炼，就连站立和工作，甚至呼吸也是由骨骼肌完成的。

骨骼肌作为人体运动系统的重要组成部分，以其在运动过程中的关键作用，历来在运动科学领域研究中受到研究者的广泛重视。首先在现代竞技体育领域，竞争越来越激烈，运动员在各种直接或间接身体对抗过程中，骨骼肌的损伤也越来越常见。即便在日常大众健身锻炼过程中，骨骼肌损伤也属于常发的运动损伤之一。这给伤者的身体健康带来严重的影响，疼痛、肌肉僵硬、萎缩或挛缩，运动功能障碍甚至运动能力的丧失。

多年以来，运动科学研究者采用各种先进手段，从骨骼肌形态结构、病理生理、损伤机制、修复进程、治疗手段等诸多方面对其进行了研究分析，取得了积极的进展。如在确定肌肉整体功能、表面肌电、高速摄影等领域，有着诸多新发现。随着现代医学科技的不断进步，越来越多的先进手段为运动科学领域所采用，国内外开始有学者致力于骨骼肌损伤修复的微观化研究，如利用不同的干预手段施加于体外培养的骨骼肌卫星细胞，影响其活性以及分化，并通过细胞生物学或分子生物学技术进行后续检测等，也取得了令人欣喜的成绩。

笔者在教学和科研工作过程中，致力于从事骨骼肌损伤修复机制相关研究，对骨骼肌形态功能研究的微观化进展尤其关注。受中国博士后科学基金项目、北京市高校青年英才计划项目、教育部博士点基金项目的资金支持，在骨骼肌卫星细胞增殖、分化方面做了一些有益的探索，为后续开展更深一步的研究打下了初步的基础。

本书在介绍骨骼肌基本结构与运动功能的基础上，详细阐明骨骼肌损伤修复机制及其后康复治疗的方法，对常见的骨骼肌损伤逐一介绍并提供预防及康复方案，对骨骼肌相关的知识进行了深入和详尽的总结和阐述。同时本书对运动科学领域当前对骨骼肌损伤修复方面的最新研究技术和成果也进行了综述和说明，并对研究热点骨骼肌卫星细胞相关研究做了重点阐释。最后，笔者所在的研究课题组通过近年的努力，在体外培养骨骼肌卫星细胞进行干预研究方面取得的一些阶段性研究结果也一并介绍，力图给读者呈现更为全面的骨骼肌研究现状。需要指出的是，本书撰写过程中引用了诸多前辈研究者的观点和成果，因此要对此方面的学者与同行表示由衷的敬意

由于水平有限，错误疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

刘永
2015年9月

目录

第一章 人体骨骼肌损伤修复的结构基础	(1)
一、骨骼肌的分类	(1)
二、骨骼肌的构造	(2)
三、骨骼肌的物理特性	(9)
四、骨骼肌的起止、配布和工作	(10)
五、骨骼肌的比较解剖	(16)
六、参考文献	(17)
第二章 人体骨骼肌的运动功能基础	(19)
一、运动人体的肌群	(19)
二、研究肌肉功能的方法	(29)
三、肌肉力量基础	(33)
四、骨骼肌的生物力学特性	(39)
五、发展肌肉力量与伸展性的解剖学依据与原则	(46)
六、发展肌肉力量、柔韧素质的注意事项 ..	(50)
七、科学的运动训练对骨骼肌的影响	(53)
八、参考文献	(54)

第三章 骨骼肌损伤与修复机制	(56)
一、骨骼肌组织的适应和损伤	(56)
二、骨骼肌细胞修复	(60)
三、运动性骨骼肌损伤的临床分型	(64)
四、骨骼肌损伤的临床治疗方法	(69)
五、骨骼肌康复评定	(70)
六、肌肉康复训练的原则与方法	(74)
七、运动损伤的具体治疗与康复方法	(76)
八、参考文献	(78)
第四章 运动中常见的骨骼肌疾病	(79)
一、肌肉拉伤	(79)
二、跟腱断裂	(82)
三、肩周炎	(84)
四、腱鞘炎	(86)
五、腰背肌劳损	(88)
六、糖尿病骨骼肌疾病	(89)
七、骨骼肌痉挛	(89)
八、神经性肌肉疾病	(91)
九、各类体育运动项目中常见损伤及其预防	(93)
十、参考文献	(100)
第五章 骨骼肌损伤修复研究进展	(102)
一、骨骼肌研究动物模型	(102)
二、骨骼肌研究细胞模型	(104)
三、运动对骨骼肌微观形态结构变化的影响	(107)
四、运动对骨骼肌代谢机能的影响	(110)
五、干细胞研究	(116)
六、骨骼肌细胞凋亡研究	(119)
七、骨骼肌细胞自噬研究	(120)

八、参考文献	(123)
第六章 低氧对骨骼肌卫星细胞的影响	(126)
一、引言	(126)
二、材料与方法	(130)
三、结果	(138)
四、讨论	(145)
五、结论	(149)
六、致谢	(149)
七、参考文献	(149)
第七章 电刺激对骨骼肌卫星细胞的影响	(153)
一、引言	(153)
二、材料与方法	(155)
三、结果	(160)
四、讨论	(170)
五、结论	(174)
六、致谢	(174)
七、参考文献	(174)
附 录	(177)
后 记	(178)

第一章 人体骨骼肌损伤修复的结构基础

骨骼肌的源头被认为是中胚层的细胞群，中胚层“侧板”的细胞随着生长向四肢迁移，之后增生融合形成很长的肌纤维。胎儿期肌纤维不断增加，其数量被认为是在这一时期决定的，也就是说，出生之后肌纤维会变粗但数目不会继续增加。20~30岁骨骼肌的尺寸会增加至最大，约30岁开始，骨骼肌纤维逐渐变细，40~50岁后骨骼肌纤维在变细的同时其数目也会逐渐变小。

骨骼肌是运动系统的动力部分，多数附着于骨骼上，在人体内分布极为广泛，总数有600余块，约占体重的40%。每块骨骼肌都具有一定的形态、结构、位置和辅助装置，执行一定的功能，有丰富的血管和淋巴管分布，并接受神经的支配，所以每块骨骼肌均可视为一个独立的器官。

一、骨骼肌的分类

骨骼肌的形态多种多样，按其形态可分为长肌、短肌、扁肌和轮匝肌4种类型。

（一）长肌

长肌的肌束通常与肌肉的长轴平行，收缩时肌肉明显缩短，可引起大幅度的运动，多见于四肢，如肱二头肌。

长肌又可根据起端头数的多少分为二头肌（如肱二头肌、股二头肌）、三头肌（如肱三头肌、小腿三头肌）或四头肌（如股四头肌）；根据肌腹的数目可分为二腹肌（如肩胛舌骨肌）或多腹肌（如腹直肌）。另外，根据肌束的方向与肌长轴的关系可分为与肌束平行排列的梭形肌（如缝匠肌）或菱形肌（如菱形肌）；半羽状排列的半羽肌，如半膜肌、指伸肌；羽状排列的羽肌如股直肌；多羽状排列的多羽肌，如三角肌；放射状排列的如斜方肌等。

（二）短肌

短肌小而短，具有明显的节段性，收缩幅度较小，多见于躯干深层（如横突间肌、肋间内/外肌）。

（三）扁肌

扁肌又称阔肌，形宽扁呈薄片状，多见于躯干浅层，胸腹壁，如背阔肌，除具有运动功能外还兼有保护内脏的功能。

（四）轮匝肌

轮匝肌主要由环形的肌纤维构成，位于人体孔裂的周围，如眼、口轮匝肌，收缩时可以关闭孔裂。

眼轮匝肌：眼裂周围，分为眶部、睑部和泪囊部。睑部纤维收缩可眨眼，与眶部纤维共同收缩使眼裂闭合；泪囊部纤维可扩大泪囊，使囊内产生负压，利于眼泪引流。

口轮匝肌：收缩时闭口，并使上、下唇与牙紧贴。

二、骨骼肌的构造

（一）肌肉的主要结构

每块骨骼肌均包括中部的肌腹和两端的肌腱两部分。

1. 肌腹

1.1 肌腹的大体构造

肌腹主要由肌纤维（即骨骼肌细胞）组成，色红而柔软。整个肌的外面包有结缔组织构成的肌外膜，由肌外膜发出若干纤维隔进入肌内，将其分割为较小的肌束，包被肌束的结缔组织称为肌束膜。肌束内的每条肌纤维还包有一层薄的结缔组织膜，称为肌内膜。（图 1.1）供应肌的血管、神经和淋巴管等沿着这些结缔组织深入肌内。这些结缔组织对骨骼肌具有支持、连接、营养和功能调节的作用，在肌肉受伤时可防止炎症的扩散；在运动的过程中约束肌纤维的收缩方向，还可降低不同肌纤维之间相对位移产生的摩擦力。

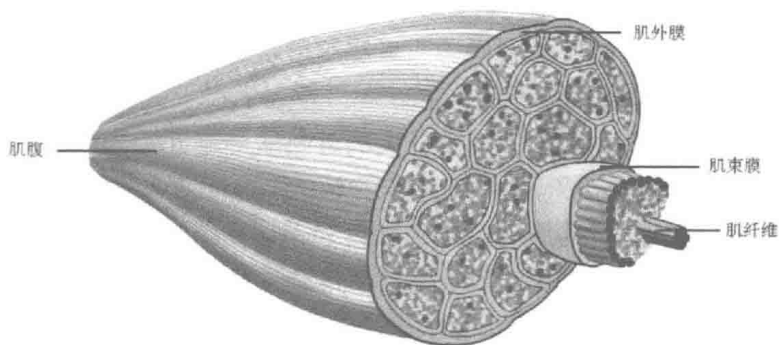


图 1.1 骨骼肌大体结构
(北体大运动解剖学教研室供图)

骨骼肌可有红肌和白肌之分。红肌大多由红肌纤维组成，较细小，收缩较慢，但作用持久；白肌主要由白肌纤维组成，较粗大，收缩较快，能迅速完成特定的动作，但作用不持久，每块肌肉均含有这两种纤维。一般来说，保持身体姿势的肌肉，含红肌纤维多；快速完成动作的肌肉，含白肌纤维多。

快肌纤维多的人被认为是短跑运动员型，而慢肌纤维多的人被认为是马拉松运动员型。一般认为，同一肌肉中红白肌纤维的比例是由遗传决定的，这就意味着对于一个人，出生时即可大致判断其是否能够在短跑 / 马拉松运动中成为优秀运动员，因此可以应用于选材研究。大量研究证实，通过训练增加快肌纤维的比例是很困难的，但对于慢肌纤维来说通过长期训练还存在增加的可能性，也就是说，马拉松运动员的成绩相对于短跑运动员对先天素质的依赖性更小一些。

如果要进行肌肉类型的测定，一般有两种方法：①直接获取人体肌肉组织显微观察；②间接推测，先进行 50 米计时全力跑并算出跑速，然后进行 12 分钟跑，观察距离并计时跑速，两个速度的比值与肌纤维比例有相关性，因此可推测出肌纤维的比例。

1.2 骨骼肌纤维的光镜结构

骨骼肌组织主要由骨骼肌纤维（骨骼肌细胞）构成，骨骼肌细胞呈长圆柱状，形如纤维，故习惯称为骨骼肌纤维。其直径 $10\sim 100\mu\text{m}$ ，长度不等，一般为 $1\sim 40\text{mm}$ ，长者可达到 10cm 以上，除舌肌等少数肌纤维外，极少有分支。骨骼肌纤维是多核细胞，一条肌纤维内含有几十个甚至几百个细胞核，核呈扁椭圆形，位于细胞边缘肌膜下方，线粒体较多，参与细胞供能。在骨骼肌纤维内部沿其长

轴方向平行排列的有肌原纤维，行如细丝，直径 $1\sim 2\mu\text{m}$ 。每条肌原纤维上面同步排列的有明暗相同的条纹，分别称为明带和暗带，构成了骨骼肌纤维上明暗相间的横纹，因此，骨骼肌又称横纹肌。

骨骼肌纤维的特征就是细胞巨大，大的骨骼肌细胞几乎等同于头发的大小。那么骨骼肌纤维如此大的原因是什么呢？

除骨骼肌纤维外，骨骼肌中还有一种扁平、有突起的肌卫星细胞，附着在肌纤维表面。该细胞具有干细胞性质，骨骼肌细胞即由此类细胞通过相互粘连融合形成的，这也解释了骨骼肌细胞细胞核数目多（一般有几十，甚至上百个细胞核）的原因。通过许多细胞核的分工合作维护这个“庞大”细胞的功能，如营养和能量供给，粗细及大小调节等。（图1.2）

当肌纤维受损伤后，肌卫星细胞可增殖分化，参与肌纤维的修复，因此具有干细胞性质，目前也是运动科学领域骨骼肌研究方向的热点之一。已有研究证实，骨骼肌损伤后，需要激活骨骼肌卫星细胞来提供足够的细胞核，通过增殖、分化，最终融合形成新的骨骼肌细胞，从而修复已经损伤的骨骼肌组织。而正是这一点，对骨骼肌损伤的完全修复具有重要的临床意义（传统观点认为骨骼肌损伤后只能进行纤维修复，形成瘢痕而非再生），对于高水平的竞技运动员而言尤其如此。

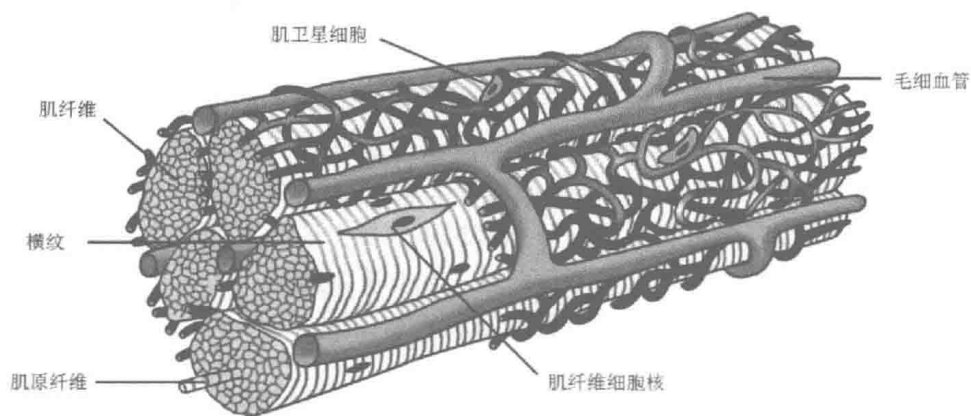


图 1.2 骨骼肌光镜结构示意图
(北体大运动解剖学教研室供图)

1.3 骨骼肌纤维的超微结构

肌原纤维暗带中央有一条浅色的窄带，称 H 带，其中央有一条深色的 M 线。明带中央有一条深色的 Z 线。两条相邻 Z 线之间的一段肌原纤维称为肌节。暗带的长度恒定，约 1.5mm；明带的长度依骨骼肌纤维的收缩或者舒张状态而异，最长可达 2mm；整个肌节的长度介于 1.5—3.5mm，在一般安静状态约为 2mm。肌节递次排列构成肌原纤维，是骨骼肌纤维结构和功能的基本单位。

肌原纤维是由粗、细两种肌丝构成，沿肌原纤维的长轴排列。粗肌丝位于肌节中部，两端游离，中央借 M 线固定。细肌丝位于肌节两端，一端附着于 Z 线，另一端伸至粗肌丝之间，与之平行，末端游离，止于 H 带的外侧。明带由细肌丝构成，H 带仅有粗肌丝，H 带两侧的暗带则两种肌丝都有。

细肌丝由肌动蛋白、原肌球蛋白和肌钙蛋白组成，肌动蛋白由球形肌动蛋白单体连接呈串珠状，并形成双股螺旋链，每个肌动蛋白单体都有一个可与粗肌丝的肌球蛋白头部结合的位点，但在肌纤维处于非收缩状态时，该位点被原肌球蛋白（两条多肽链相互缠绕形成的双股螺旋状分子，嵌于肌动蛋白双股螺旋链的浅沟内）掩盖；肌钙蛋白为球形，附着于原肌球蛋白分子，可与 Ca^{2+} 结合或解偶联。粗肌丝由肌球蛋白组成，形如豆芽，分头和杆两部分，大量肌球蛋白平行排列形成一条粗肌丝，杆尾朝向 M 线，头部朝向 Z 线并突出于粗肌丝表面，具有 ATP 酶活性，与细肌丝肌动蛋白接触的时候被激活，分解 ATP 并释放能量，头端“豆芽”屈动，带动 Z 线向 M 线拉近，肌原纤维缩短。（图 1.3）

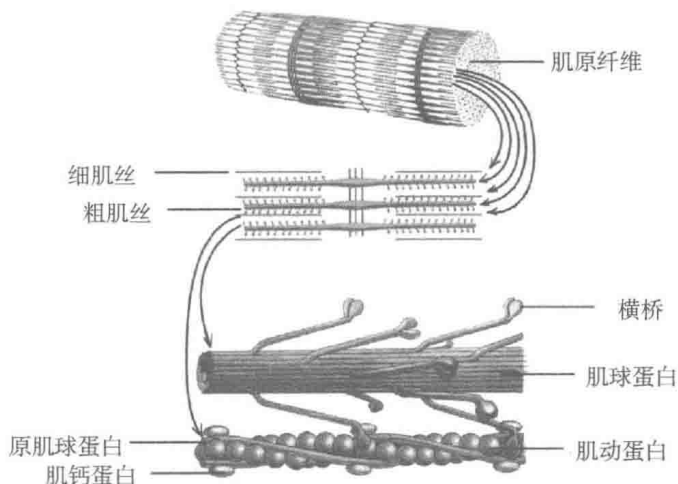


图 1.3 骨骼肌的电镜结构示意图
(北体大运动解剖学教研室供图)

1.4 骨骼肌纤维的收缩原理

骨骼肌纤维的收缩机制为肌丝滑动学说：①运动神经末梢将神经冲动传递给肌膜；②肌膜的兴奋经过横小管传递给肌浆网，大量钙离子涌入肌浆；③钙离子与肌钙蛋白结合，造成后者构型或位置变化，暴露肌动蛋白上与肌球蛋白头部的结合位点，二者迅速结合；④ATP被分解并释放能量，肌球蛋白的头及杆发生屈动，将肌球蛋白向M线牵引；⑤细肌丝向M线滑动，明带缩短，肌节变短，肌纤维收缩；⑥收缩结束后，钙离子被泵回肌浆网，肌钙蛋白恢复，肌纤维松弛。

2. 肌腱

肌腱主要由平行致密的胶原纤维束构成，在外面由纤维组织包绕形成束状，色白、强韧而无收缩功能，位于肌腹部分的两端，每平方厘米肌腱可以承受600~1200kg的拉力，其抗张力强度为肌腹部分的112~233倍。肌腱附着于骨骼，起到连接作用并传递力量。当肌肉所受到的外力超出肌腱的承受能力时，一般被拉长的长度超过其自身长度的6%~8%时会发生断裂。由于肌腱对拉力的承受能力远高于肌肉，所以拉伤常常发生在肌腹、肌腱结合部或骨附着处。长期的牵拉会导致纤维细胞向肌腱的渗透，导致局部胶原纤维数量增加。反复的细微损伤会引起慢性肌肉拉伤，导致胶原纤维数量减少，使肌腱强度下降。胶原纤维减少的现象发生在参加运动的初期和活动受限时，所以运动时应该遵循循序渐进和力度递增的原则，在损伤的康复阶段要逐步进行活动。

肌腱属于规则的致密结缔组织，其大量密集的胶原纤维顺着受力的方向平行排列成束。纤维束之间有腱细胞，为一种特殊形态的成纤维细胞，胞体伸出多个薄翼状突起插入纤维束之间。

（二）肌肉的辅助结构

肌肉周围有一些利于肌肉活动的结构，称为肌肉的辅助结构，包括筋膜、腱鞘、滑膜囊、籽骨和滑车等。这些结构有助于保持和约束肌的位置，减少运动时的摩擦和保护等功能。

1. 筋膜

筋膜是包在肌肉外面的结缔组织，遍布全身，分为浅筋膜和深筋膜两种。

浅筋膜又称皮下组织、皮下筋膜，位于真皮之下，包被全身各部，由疏松结缔组织构成，其内含脂肪，含量因身体的部位、性别及营养状态而不同，对保持体温有一定作用。人体个别部位浅筋膜内缺乏脂肪组织，如眼睑、耳廓。浅动脉、

皮下静脉、皮神经、淋巴管走行于浅筋膜内，局部还可能有乳腺和皮肤。

深筋膜又称固有筋膜，由致密结缔组织构成，位于浅筋膜的深面，它包被体壁、四肢的肌和血管神经等。深筋膜与肌的关系非常密切，随肌的分层而分层。在四肢，深筋膜插入肌群之间，并附着于骨、构成肌间隔，将功能、发育过程和神经支配不同的肌群分隔开来，与包绕肌群的深筋膜构成筋膜鞘保证其单独活动，在临床上有很大意义。当一块肌由于水肿等原因肿胀时，由于筋膜限制了其体积膨胀，可出现疼痛症状。在肌数目众多而骨面不够广阔的部位，它可供肌附着作为肌的起点。在腕部和踝部，深筋膜增厚形成支持带，有约束、支持其深面的肌腱的作用。

2. 腱鞘

腱鞘是套在活动性较大的腕、踝、手指和足趾肌腱周围的密封双层筒状鞘管，可分为纤维层和滑膜层两部分。纤维层位于外层，为深筋膜增厚所形成的纤维性管道，起着滑车和约束肌腱的作用。滑膜层位于腱纤维层内，是由滑膜构成的双层圆筒形的鞘。

若手指不恰当地做长期、过度且快速的活动，可导致腱鞘损伤，产生疼痛并影响肌腱的滑动，称腱鞘炎，是一种常见病。

3. 滑膜囊

滑膜囊为封闭的结缔组织囊，壁薄，是关节囊的滑膜层向关节外突出所形成的，内有少许滑液，多位于肌或肌腱与骨面相接触处，以减少两者之间的摩擦。滑膜囊的炎症可影响肢体局部的运动功能。如在肩关节，在肩胛下肌的深面有滑膜囊，在肱二头肌长头腱自关节囊穿出后也有滑膜囊包裹，均可减少摩擦，有利于肌腱的活动。

4. 籽骨

籽骨是由肌腱骨化而成的小骨，直径一般只有几毫米，但髌骨例外，为全身最大的籽骨。位于肌腱面对关节的部位，或固定于肌腱以锐角绕过骨面处。前者能替代并组成关节囊，以变更、缓和所承受的压力；后者能使肌腱较灵活的滑动于骨面，从而减少摩擦并改变骨骼肌牵引的方向。

5. 滑车

滑车有两种：一种是覆盖有软骨的槽，称为骨性滑车，有肌腱或籽骨在此滑动，如股骨下端前面的髌面，以及内、外踝等处。另一种是通过肌腱的结缔组织环，有肌腱从环中通过。肌腱通常在滑车处改变方向，由于滑车的存在，肌腱不会向

旁边移位，并减少运动时候的摩擦。

（三）血管、淋巴管 and 神经

作为器官的肌，不仅包括其主要结构和辅助结构，还包括了血管、淋巴管和神经等。

1. 肌肉的血液供应

每块肌都有自己的血液供应，血管束多与神经伴行，沿肌间隔、筋膜间隙行走，进入肌门，经反复分支，最后在肌内膜形成包绕肌纤维的毛细血管网，然后由毛细血管网汇入微静脉和小静脉离开肌门。肌的代谢旺盛，血供丰富，对缺血较为敏感。

肌腱的血供较少，一般来自肌腹，但较长的肌腱可在其中段或止端有血管进入。

有氧工作是指机体在氧供充足的情况下由能源物质氧化分解提供能量所完成的工作。氧供充足是实现有氧工作的先决条件，也是制约有氧工作的关键因素。无氧工作是指运动中人体通过无氧代谢途径提供能量进行运动的能力，由两部分组成，即 ATP-CP 分解供能和糖无氧酵解供能。

2. 肌肉的淋巴回流

肌的淋巴回流始于肌的毛细淋巴管，它们位于肌外膜和肌束膜内，离开肌肉后沿途伴随静脉回流，并汇入较大的淋巴管中。

3. 肌肉的神经支配

每块肌的神经多与主要的血管束伴行，支配肌的神经有躯体神经及自主神经，躯体神经有传入纤维及传出神经两种。传入纤维传递肌的痛温觉和本体感觉，后者主要感受肌纤维的舒缩变化，在调节肌的活动中起重要作用。骨骼肌的收缩受传出纤维支配。一个运动神经元轴突支配的骨骼肌纤维数目多少不等，少者 1~2 条，多者上千条，而每条骨骼肌纤维通常只有一个轴突分支支配。

一个运动神经元的轴突及其分支所支配的全部骨骼肌纤维合起来成为一个运动单位。因此，运动单位的大小相差很大，需要精细控制运动的骨骼肌，如眼外肌、运动单位很小，一个神经细胞仅管理 6~12 条肌纤维。运动单位是肌收缩的最小单位，在正常清醒的人体中，各肌都有少量的运动单位在轮流收缩，使肌肉保持一定的张力，称肌张力，对维持身体的姿势起着重要作用。

每次运动不可能动用所有运动单位，受阻力越大动用的运动单位越多，这也