

# 肌腱如何运作与愈合

本页面由机器翻译，尚未经临床医生审核。**英文版本**为权威版本。

肌腱是人体的“缆绳”，是连接肌肉与骨骼的坚韧索带，负责将肌肉的牵拉力转化为运动。当你弯曲手指或抬起手臂时，正是肌腱在跨越关节传递力量。肌腱虽然坚固，但愈合缓慢且具有特定方式，且并非所有肌腱的愈合方式都相同。手指屈肌腱的切割伤与肩部肩袖肌腱的撕裂伤遵循截然不同的愈合过程，这正是它们的手术和康复方案差异巨大的原因。本页以通俗易懂的语言解释肌腱是什么以及它们如何修复，随后深入探讨其生物学机制，供感兴趣的读者参考，包括为什么屈肌腱修复后会先变弱再变强，以及为什么肩袖肌腱会以特定的方式愈合到骨骼上。

## 肌腱是什么及其功能

肌腱主要由**胶原蛋白**（赋予骨骼柔韧性的同一种强韧蛋白质）构成，这些胶原纤维紧密排列成束，沿受力方向延伸。肌腱的一端与肌肉融合，另一端锚定于骨骼。其功能简单却至关重要：将肌肉产生的力量传递至骨骼，从而使关节运动。部分肌腱还需具备**滑动**功能：例如弯曲手指的屈肌腱，每次握拳时都会在狭窄的隧道中来回滑动。

肌腱属于活体组织，但活性较低：与肌肉或皮肤相比，其细胞数量较少，血液供应也较为稀疏。这正是其愈合缓慢的主要原因之一。

## 肌腱如何愈合

当肌腱被切断或撕裂时，其愈合过程与其他组织类似，分为三个相互重叠的阶段：

- 1. 炎症期（第一周）。** 血凝块形成，修复细胞迁入。在此阶段，连接处主要依靠外科医生的缝合线维持；肌腱本身提供的强度非常有限。
- 2. 修复期（数周）。** 细胞在间隙处沉积新的胶原蛋白，但起初这些胶原排列无序且强度较弱，就像匆忙捆扎的一束线头，而非整齐结实的绳索。
- 3. 重塑期（数月）。** 随着时间推移和温和的使用，无序的胶原蛋白逐渐被替换并沿受力方向重新排列，肌腱随之恢复强度。这一过程持续数月，通常长达一年或更久。

关键点：肌腱主要通过形成**瘢痕**来愈合，而非完美地重新生长出原始组织。修复后的部位永远无法达到原始组织的完美状态，因此精心的康复训练和耐心至关重要。

## 促进肌腱愈合的因素

- **适量的活动。** 肌腱对负荷有反应。受控的、分级的运动（由手部专科医生或物理治疗师指导）能引导愈合中的胶原蛋白有序排列。过早或过量活动会导致修复部位断裂；活动不足则会导致僵硬，并使肌腱因瘢痕而粘连。
- **早期保护修复部位。** 新的肌腱修复在数周内都很脆弱，即使感觉良好也是如此；请遵循支具佩戴和活动限制要求，以防止修复部位被拉开。
- **良好的整体健康状况。** 不吸烟、控制糖尿病以及避免不必要的类固醇使用均有助于愈合；尤其是吸烟会损害肌腱愈合。
- **时间。** 肌腱是愈合缓慢的组织。真正恢复力量需要数月，而非数周。

## 深入探讨

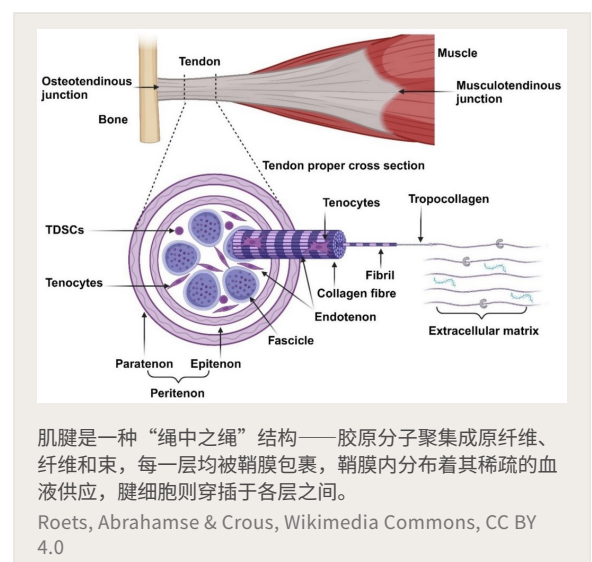
本节将提供更具细节的、学生水平的生物学解释。理解肌腱损伤或其治疗并不需要这部分内容，但如果您好奇肌腱究竟是如何工作的，以及为何手指肌腱与肩关节肌腱的愈合方式存在如此显著的差异，请继续阅读。

### 作为活组织的肌腱

肌腱由胶原蛋白构成，其结构呈现**层级**特征，类似由越来越细的纤维束编织而成的绳索。胶原蛋白分子聚集成**微原纤维**，微原纤维聚集成**纤维**，纤维聚集成**纤维束**，纤维束最终构成完整的肌腱；在每一层级，都有一层薄薄的结缔组织包裹（肌腱内部的腱内膜，以及包裹整个肌腱的腱外膜），其中分布着微小的血管和神经。胶原蛋白主要为**I型**，在张力下具有极高的强度，且其排列方向几乎与受力方向完全平行。

在静息状态下，纤维呈现波浪状的皱褶模式。当首次对肌腱施加负荷时，这种**皱褶**会被拉直，因此肌腱在受力的初始阶段会表现出轻微的弹性，随后变得僵硬且强韧（其内部具有一定的顺应性）。肌腱还具有**粘弹性**：其力学行为取决于负荷施加的速度（快速加载时刚度更高），并且在持续负荷下会缓慢发生**蠕变**（伸长）。

其中的活细胞是**腱细胞**，为稀疏分布的梭形细胞，穿插于胶原束之间。它们负责维持并极缓慢地更新细胞外基质。由于细胞和血管相对稀少，且某些肌腱的特定区域确实存在**低血供**（血供较差的“分水岭”区），肌腱愈合速度缓慢，而这些血供不良的区域正是某些肌腱容易发生撕裂且愈合不良的部位。



## 肌腱如何愈合——以及为何主要依靠瘢痕

上述三个阶段，更详细的描述如下：**炎症期**（大约为第一周）清除碎片并招募细胞；**增殖期**（约一至三周）期间，细胞大量生成**无序的III型胶原**，其沉积迅速但机械强度较弱；以及一个漫长的**重塑期**（数月，最长可达约18个月），在此期间，该III型胶原逐渐被强韧、排列有序的**I型胶原**所取代，后者形成交联并沿负荷方向定向排列。

关键概念在于，这是**瘢痕修复，而非再生**。机体修补了缺损，而非重建原本结构精美的有序肌腱。将早期脆弱的瘢痕转化为强韧且有序结构的是**机械负荷**。这正是现代肌腱康复的全部理论基础：在正确的时间施加可控的力，实际上是在指导瘢痕如何转变为肌腱。

## 屈肌腱愈合：内在愈合与外在愈合，以及屈曲做功

弯曲手指的屈肌腱是一种特殊情况，因为它们必须**滑动**穿过一个狭窄的隧道（即带有滑轮的屈肌腱鞘）才能发挥作用。这在屈肌腱手术中产生了一种张力，并涉及肌腱愈合的两种不同方式：

- **内在愈合**源自肌腱自身的细胞，由鞘内的**滑液**以及称为**腱系带**的微小血管褶皱提供营养。屈肌腱主要不是由血管，而是由滑液滋养的；每次手指弯曲和伸直时，滑液都会被主动泵入肌腱（这一过程称为**吸收**）；因此，运动本身就在滋养愈合中的肌腱。内在愈合将肌腱重新连接起来，而不使其与周围组织粘连，从而使其仍能滑动。
- **外在愈合**源自从外部侵入的细胞和瘢痕，来自腱鞘及周围组织。它也能使肌腱愈合，但会将其粘附在隧道上，形成阻碍滑动的**粘连**，导致手指无法完全弯曲或伸直。

现代修复技术加上早期受控运动旨在将平衡倾向于内在愈合，并远离粘连。

这正是**屈曲做功**发挥作用的地方：肌肉必须产生的实际力量以屈曲手指。这不仅仅是被移动的重量；它是肌腱滑动的阻力：鞘内的摩擦、修复本身的大小、术后肿胀以及紧绷的滑轮都会增加这种阻力。如果屈曲做功（阻力）升高到超过修复所能承受的程度，修复处就会**裂开或断裂**，或者手指根本无法活动，粘连随之形成。因此，外科医生正在平衡两种相互竞争的需求：修复必须足够坚固以耐受早期运动，同时又必须足够纤细光滑，以便以较低的屈曲做功进行滑动。只有当这两点都实现时，早期运动才有效。

## 为什么屈肌腱修复在变强之前会先变弱

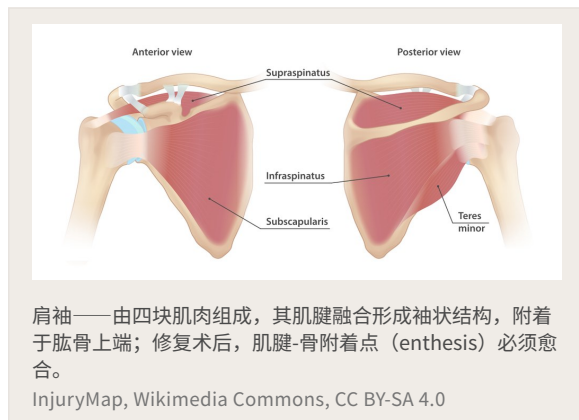
这里有一个反直觉的要点，它解释了整个谨慎的康复时间表。肌腱修复**并非**从第一天起就稳步增强。它遵循一条**U形曲线**：

- **在最初几天**，几乎全部强度来自**缝合线**；肌腱组织本身几乎不贡献任何强度。
- **在最初一到三周内**，被切断的肌腱末端实际上会**软化**：身体在修复部位吸收并重塑胶原，早于新胶原成熟。因此，整个结构在早期几周达到最弱点（通常在第一周末至第三周之间），尽管伤口看起来已愈合且手指感觉正常。
- **随后强度上升**。随着无序的III型胶原被对齐、交联的I型胶原取代，修复部位恢复并随后超过其初始强度，在约12周时达到足以应对大多数日常活动的水平，并继续成熟数月。

这种下降正是手部治疗被如此仔细分期的原因，也是“三周时感觉正常”是一个陷阱的原因：那往往正是修复最脆弱的时刻。早期阶段的温和、受控运动可保持肌腱滑动（有利于内在愈合），并使新胶原对齐，

而不会过度负荷在生物学上处于最弱状态的修复部位。肌腱修复后的断裂恰好聚集在这些脆弱的早期几周，原因就在于此。

### 肌腱-骨愈合：肩袖与腱骨结合部



肩袖撕裂是一个完全不同的问题，因为此处肌腱必须重新愈合到骨上，而肌腱与骨之间的连接处是一种称为**腱骨结合部（enthesis）**的非凡结构。

在健康组织中，腱骨结合部是一个**分级过渡区**，大致由四个区域构成：肌腱 → 未钙化纤维软骨 → 钙化纤维软骨 → 骨。这种从柔软、有弹性的肌腱到坚硬、僵硬的骨的温和梯度分布了应力，因此柔软的肌腱不会在尖锐的边界处直接从坚硬的骨上被撕裂下来。

关键在于，一旦撕裂，**身体无法重建这种分级的腱骨结合部**。修复后的肩袖通过肌腱与骨之间的**纤维血管性瘢痕愈合**，其机械强度低于原始的四个区域过渡结构，这也是肩袖修复术在手术操作良好的情况下仍可能**再撕裂**的原因之一。

同样重要的是，大多数肩袖撕裂是**退行性的，而非纯粹创伤性的**：随着年龄增长，肌腱（特别是位于冈上肌肌腱与骨连接处约1厘米处、血供相对较差的“**危险区**”）会减弱、磨损并撕裂，且往往伴随轻微或无外伤（真正的肩袖撕裂在50岁以前很少见）。手术将肌腱重新附着于其骨性“足迹”，但这是在对抗衰老以及通常质量较差的组织。因此，肩袖愈合从根本上受生物学限制：手术恢复了解剖结构，但肌腱-骨连接处是否真正愈合取决于肌腱质量、撕裂大小、年龄、吸烟、糖尿病以及修复后的保护与负荷情况。这与年轻手部干净的屈肌腱切割伤处于光谱的另一端：相同的组织，却是非常不同的愈合问题。

### 促进与损害肌腱愈合的因素

- **负荷，剂量得当。** 受控的、渐进性的负荷是增强肌腱强度与排列的最强有力工具。过早施加过大负荷会导致修复处断裂；负荷不足则会导致僵硬和粘连。康复的艺术在于剂量。
- **血液供应。** 血供丰富的肌腱愈合更好；低血供的“分水岭”区域（如肩袖的部分区域）愈合较差。
- **吸烟、糖尿病、类固醇及年龄** 均会损害肌腱愈合，并增加断裂和再撕裂的风险。
- **时间。** 肌腱是慢组织；获得有意义的强度需要数月，而完全重塑可能持续超过一年。

## 另请参阅

- **骨骼愈合与重塑** — 肌腱-骨修复中骨骼侧的表现
- **吸烟与肌肉骨骼愈合** — 吸烟为何会延缓肌腱和骨骼愈合
- **皮质类固醇注射** — 肌腱周围的类固醇：用途与注意事项