

# 肌腱的工作原理与愈合

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。

肌腱是身体的“缆绳”，是坚韧的索状结构，将肌肉连接至骨骼，并将肌肉的收缩力转化为运动。当你弯曲手指或举起手臂时，正是肌腱在发挥作用，将力量跨越关节传递。肌腱虽然强壮，但其愈合缓慢且具有特定的方式，且并非所有肌腱的愈合过程都相同。手指屈肌腱的切割伤与肩袖肌腱的撕裂伤，其愈合过程截然不同，因此它们的手术与康复方案也大相径庭。本页以通俗易懂的语言解释肌腱是什么以及它们如何愈合，随后深入探讨其生物学机制，包括为什么屈肌腱修复后会先变弱再变强，以及肩袖肌腱为何以特定方式愈合于骨骼。

## 肌腱是什么以及其功能

肌腱主要由**胶原蛋白**（赋予骨骼柔韧性的坚韧蛋白质）构成，呈绳索状，紧密排列成束，沿拉力方向行走。一端与肌肉融合，另一端锚定于骨骼。其功能简单但至关重要：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：屈肌腱在每次握拳时，会在狭窄的隧道内来回滑动。

肌腱是活体组织，但活性较低：与肌肉或皮肤相比，其细胞数量相对较少，血液供应稀疏。这也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，它会经历三个重叠的愈合阶段，与其他组织类似：

- 炎症期（第一周）。** 形成血凝块，修复细胞开始迁移。在此阶段，连接处主要由外科医生的缝合线固定；肌腱本身提供的强度非常有限。
- 修复期（数周）。** 细胞在间隙处沉积新的胶原蛋白，但起初排列无序且强度较弱，就像匆忙打结的一束线，而非整齐的绳索。
- 重塑期（数月）。** 随着时间的推移和适度的使用，这些无序的胶原蛋白逐渐被替换，并沿受力方向重新排列，肌腱恢复强度。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，而非完美地再生原始组织。修复后的部分永远无法完全恢复到原始状态，因此谨慎的康复训练和耐心至关重要。

# 什么有助于肌腱愈合

---

- **适量的活动。** 肌腱对负荷有反应。在手外科医生或物理治疗师指导下的控制性、渐进性运动，能够指导愈合中的胶原纤维进行有序排列。过早或过度的活动会导致修复处断裂；而活动不足则会导致僵硬，并使肌腱因瘢痕粘连而固定。
- **早期保护修复部位。** 新鲜的肌腱修复在数周内即使感觉良好也很脆弱；请遵循您的夹板佩戴要求和活动限制，以防止修复处撕裂。
- **良好的全身健康状况。** 不吸烟、控制糖尿病以及避免不必要的类固醇使用均有帮助；特别是吸烟会损害肌腱愈合。
- **时间。** 肌腱是愈合缓慢的组织。真正的力量恢复需要数月，而非数周。

## 更深入的了解

---

本节将深入探讨更详细、适合学生水平的生物学知识。了解肌腱损伤及其治疗并不需要这些内容，但如果您对肌腱的实际工作原理以及为何手指肌腱与肩关节肌腱的愈合方式存在显著差异感到好奇，请继续阅读。

### 肌腱作为活体组织

肌腱由胶原构成，呈**层级**结构，犹如由越来越细的股线编织而成的绳索。胶原分子聚集成**微纤维**，微纤维聚集成**纤维**，纤维聚集成**束**，束再聚集成整条肌腱；在每一层级，均有薄层结缔组织包裹（即内腱周组织和包裹整条肌腱的外腱周组织），其中穿行着细小的血管和神经。胶原主要为**I型**，具有极强的抗张强度，并几乎完美地平行于受力方向排列。

在静息状态下，纤维呈波浪状、锯齿状的波纹模式。当肌腱首次承受负荷时，这种**波纹**会被拉直，这就是为什么肌腱在受力的最初阶段具有轻微的弹性，随后才变得坚硬且强壮（其内部具有一定的缓冲余地）。肌腱还具有**粘弹性**：其力学行为取决于加载速度（快速加载时更僵硬），并且在持续负荷下会缓慢**蠕变**（伸长）。

活细胞为**腱细胞**，它们是稀疏分布的梭形细胞，串连于胶原束之间。它们负责维持并极其缓慢地更新基质。由于细胞和血管相对稀少，且某些肌腱的部分区域确实存在**低血管供应**（即血供较差的“分水岭”区域），因此肌腱愈合缓慢，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——以及为何主要通过瘢痕愈合

上述三个阶段更详细的描述如下：**炎症期**（大约在第一周）清除碎屑并招募细胞；**增殖期**（大约一至三周），在此期间细胞大量产生**无序的III型胶原**，其沉积迅速但机械强度较弱；以及漫长的**重塑期**（数月，长达约18个月），在此期间III型胶原逐渐被强韧、排列整齐的**I型胶原**所取代，这些I型胶原发生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**。机体只是修补了缺损，而非重建原本结构精美的肌腱。将早期脆弱的瘢痕转化为强韧且排列有序的组织的关键因素是**机械负荷**。这正是现代肌腱康复治疗核心理念：在适当时机施加可控的力，直接指导瘢痕如何转化为肌腱。

## 屈肌腱愈合：内在愈合与外在愈合，以及屈曲功

负责弯曲手指的屈肌腱是一个特例，因为它们必须在狭窄的通道（即带有滑车系统的屈肌腱鞘）中滑动才能发挥作用。这在屈肌腱手术中造成了核心张力，并使肌腱产生两种不同的愈合方式：

- **内在愈合**源于肌腱自身的细胞，这些细胞由腱鞘内的滑液以及称为**血管束**（vincula）的微小血管褶所滋养。屈肌腱主要不是由血管供血，而是由滑液滋养；每次手指屈曲和伸直时，滑液会被主动泵入肌腱（这一过程称为**浸吸作用**）；因此，运动本身即为愈合中的肌腱提供营养。内在愈合将肌腱重新连接，而不使其与周围组织粘连，从而保持其滑动能力。
- **外在愈合**源于来自外部（即腱鞘和周围组织）的细胞和瘢痕组织侵入。它也能愈合肌腱，但会将肌腱“粘”在腱鞘隧道中，形成**粘连**，阻碍肌腱滑动，导致手指无法完全屈曲或伸直。

现代修复技术结合早期可控运动，旨在使平衡倾向于内在愈合，并减少粘连。

这就是**屈曲功**发挥作用的地方：指肌肉为了实际弯曲手指所必须产生的力量。它不仅仅是移动重量的力量；而是肌腱滑动的阻力：腱鞘内的摩擦、修复体本身的体积、术后肿胀以及紧张的滑车都会增加这种阻力。如果屈曲功（即阻力）升高到修复体无法承受的程度，修复处就会**张开或断裂**，或者手指根本无法活动并发生粘连。因此，外科医生需要在两种相互竞争的需求之间取得平衡：修复体必须足够坚固以耐受早期运动，同时又必须足够纤细光滑，以便以较低的屈曲功进行滑动。只有同时实现这两点，早期运动才有效。

## 为什么屈肌腱修复在变强之前会先变弱

以下是解释整个谨慎康复时间线的反直觉部分。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**，几乎所有的强度都来自**缝线**；肌腱组织本身几乎不提供任何强度。
- **在最初的一到三周内**，切断的肌腱断端实际上会**变软**：机体在修复部位吸收并重塑胶原，而新胶原尚未成熟。因此，整个结构在早期（通常在第一周结束到第三周之间）达到最弱点，尽管伤口看起来已愈合，手指感觉良好。
- **随后强度上升**。随着无序的III型胶原被排列整齐、交联的I型胶原取代，修复处恢复并超过其初始强度，在约12周时达到大多数日常活动所需的强度，并在此后数月内继续成熟。

正是由于这一强度下降期，手部治疗才如此分阶段进行，而“第三周感觉良好”是一个陷阱：此时修复处往往是最脆弱的。在早期阶段进行轻柔、受控的活动可使肌腱滑动（有利于内在愈合）并排列新胶原，而不会使生物学上处于最弱点的修复处过载。肌腱修复后的断裂正是集中发生在这几个脆弱的早期周数，原因正在于此。

## 肌腱-骨愈合：肩袖与骨附着点

肩袖撕裂是一个完全不同的问题，因为在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**骨附着点**（enthesis）的非凡结构。

在健康组织中，骨附着点是一个**梯度过渡区**，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散了应力，从而防止柔软的肌腱在锐利的边界处直接从坚硬的骨上被撕脱。

关键在于，一旦撕裂，**身体无法重建这种梯度的骨附着点**。修复后的肩袖在肌腱与骨之间通过**纤维血管瘢痕愈合**，其机械强度弱于原始的四个区域过渡结构，这也是尽管手术操作良好，肩袖修复仍可能**再次撕裂**的原因之一。

同样重要的是，大多数肩袖撕裂是**退行性而非单纯创伤性的**：随着年龄增长，肌腱（特别是在肩胛上肌腱与骨连接处约一厘米处的相对血供较差的“**临界区**”）会减弱、磨损并撕裂，且往往没有明显或仅有轻微的损伤（真正的肩袖撕裂在50岁左右之前很少见）。手术将肌腱重新附着到其骨性“**足迹**”上，但这是在对抗老化且通常质量较差的组织。因此，肩袖愈合从根本上受限于生物学因素：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和负荷情况。这与年轻手部发生的清洁屈肌腱切割伤处于光谱的两端：相同的组织，却面临截然不同的愈合问题。

### 有助于和损害肌腱愈合的因素

- **负荷，需正确剂量。** 受控的渐进性负荷是增强肌腱强度和排列的最有力工具。过早或过大的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的把握。
- **血液供应。** 血供丰富的肌腱愈合较好；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、类固醇和年龄** 均会损害肌腱愈合，并增加断裂和再次撕裂的风险。
- **时间。** 肌腱是缓慢愈合的组织；有意义的力量恢复需要数月，而完全的改建过程可能持续超过一年。

## 参见

---

- **骨骼如何愈合与重塑** — 肌腱-骨修复中骨侧的行为
- **吸烟与肌肉骨骼愈合** — 为何吸烟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