

## 第 3 章 手的解剖和生物力学

### Volker Schöffl

德国班贝格医院运动医学中心骨科与创伤外科

英国利兹贝克特大学临床与应用科学学院

美国科罗拉多大学医学院急诊医学系野外医学部

德国埃尔兰根 – 纽伦堡大学骨科与创伤外科

### Isabelle Schöffl

德国巴伐利亚州埃尔兰根 – 纽伦堡大学小儿心脏病科



Isabelle Schöffl 在加拿大安大略布鲁斯半岛国家公园中途原木堆放场（Halfway Log Dump）攀石（摄影：Michael Simon）

### 3.1 解剖结构

在了解攀岩的手部解剖结构时，应分开讨论手指屈肌腱和伸肌腱，此外蚓状肌作为一个独立实体也非常重要<sup>[1]</sup>。手指和手腕的复杂运动只有通过外在和内在肌肉的协同作用才能实现<sup>[2]</sup>。外在肌肉系统是指起于肘部和前臂并止于手部的肌肉。内在肌肉系统的起止点完全位于手内部，可分为四组：大鱼际肌、小鱼际肌、蚓状肌和骨间肌。此外，手部还存在许多解剖变异<sup>[3]</sup>。

#### 3.1.1 手指伸肌肌腱

除拇指外的四指有共同的四个伸肌肌腱，此外示指伸肌和小指伸肌各有一个独立的肌腱。小指伸肌腱走行穿过第五腱室，而所有其他的肌腱均穿过第四腱室<sup>[1]</sup>。在手背平齐掌指关节，伸肌腱间交叉相连，称为腱间连接。在近端指间关节（PIP），伸肌腱分为两个侧支和一个中央支（中间束）。拇指有两条伸肌肌腱，拇长伸肌（第三伸肌剑鞘间室）和拇短伸肌（第一伸肌剑鞘室）。这些伸肌腱共同构成了外在肌肉系统，即起于肘部或前臂<sup>[1]</sup>，控制手及手指的活动。外在系统由内在系统支持，即起止点均位于手内部的肌肉，蚓状肌、骨间肌、大鱼际肌和小鱼际肌<sup>[1]</sup>。蚓状肌和骨间肌是例外，它们起自屈肌腱本身，并止于伸肌腱膜<sup>[4]</sup>。它们的功能是屈曲掌指关节（MCP）和伸展近端及远端指间关节（DIP）<sup>[1,4,5]</sup>。蚓状肌有许多解剖变异，通常相邻两根手指共享一个共同的蚓状肌，主要是第四及第五指<sup>[3,4,6]</sup>。如果其中一个手指伸展而相邻的手指屈曲，则共同的肌体会受到剪切力，Schweizer 将其称为“四马战车（quadriga）”效应，并导致“蚓状移位”现象<sup>[6]</sup>（图 3.1）。

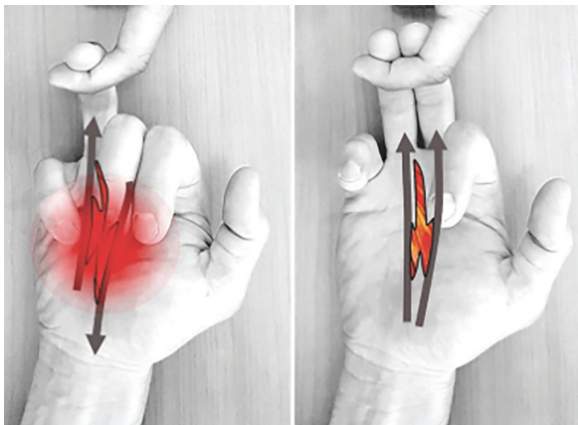


图 3.1 蚓状肌的四马战车（quadriga）效应<sup>[6]</sup>

#### 3.1.2 手指屈肌腱及其与滑车、腱鞘的功能系统

手指屈肌腱系统是将肌腱、腱鞘和滑车视为一个功能单元<sup>[1]</sup>。拇指与其余四指在屈肌腱方面有所不同。四指各有两条屈肌腱，即指深屈肌腱（FDP）和指浅屈肌腱（FDS），它们穿过腕管和滑车且有所交叉<sup>[1]</sup>。



拇指的一条屈肌腱（拇长屈肌腱）穿过腕管，沿前臂桡侧走行，然后通过一个骨纤维通道延伸至指骨基地，并由两个滑车结构加强<sup>[1]</sup>。

环状韧带和交叉韧带是屈肌腱鞘的强化结构，其作用是将肌腱引导至指骨的骨纤维通道中<sup>[7]</sup>。具体可分为5条环状韧带（A1 ~ A5）和3条较弱的交叉韧带（C1 ~ C3）<sup>[7,8]</sup>（图3.2）。这些韧带存在的形态和排列存在高度变异，特别是A3和C1/C2韧带<sup>[8,9]</sup>。所有滑车结构通过稳定指骨掌侧屈肌腱发挥不同的功能<sup>[8,10-12]</sup>。屈肌腱滑车系统的主要功能是将屈肌腱固定在指骨上，从而将线性力转化为扭矩，驱动指间关节（IP）和掌指关节的旋转运动<sup>[13]</sup>。A2和A4环状韧带在屈肌腱的力传递和偏移中起着最重要作用<sup>[14-17]</sup>。A1和A5滑车结构因具有延展性，作用相对次要<sup>[13]</sup>。而A3滑车结构位于近端指间关节，能有效地抑制肌腱“弓弦征”，维持肌腱与指骨的贴合<sup>[18-21]</sup>。

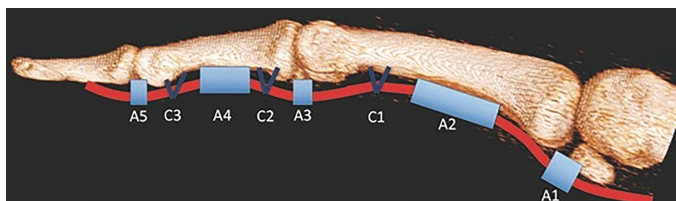


图 3.2 屈肌腱的滑车系统

滑车系统的作用是维持肌腱紧贴骨面。屈肌腱在屈曲和过度伸展时产生的力量可以有效转移，从而完成手指的全范围活动<sup>[13]</sup>。若一个或几个滑车结构受损，屈肌腱与骨骼之间的距离增加（即“肌腱-骨距离”，tendon-bone distance, TB），称为“弓弦征”，并导致力量缺失和关节活动度减小<sup>[7]</sup>（图3.3和图3.4）。这些功能障碍的程度与具体受损的滑车结构相关。如果只有一个滑车断裂，则弓弦征较轻微，且只能通过超声或MRI/CT成像检测到。如果不止一个滑车断裂，弓弦征肉眼可见且可触及，也会导致近端指间关节活动度减小。A2和A4滑车被认为是防止弓弦征及保证最佳力量传递方面最重要的滑车<sup>[12,18,22,23]</sup>。随着时间的推移，当多个滑车断裂后，肌腱和骨骼的距离增加，这相当于增大了至近端指间关节旋转中心的力臂，从而导致关节挛缩。除了力学功能外，滑车结构对屈肌腱的营养也很重要，可以主动向腱鞘分泌透明质酸<sup>[10,11]</sup>（图3.5）。

蚓状肌和骨间肌是例外，因为它们起自屈肌腱本身，止于伸肌腱的腱膜内<sup>[4]</sup>。它们是内在肌系统的一部分。其功能是屈曲掌指关节，伸展近端及远端指间关节<sup>[1,4,5]</sup>。

屈肌腱的血液供应来自肌腱骨止点处及骨纤维通道中的“腱纽”<sup>[1,4,5]</sup>。静脉引流也通过这一系统<sup>[1]</sup>。Verdan<sup>[24]</sup>根据损伤、预后和营养情况将屈肌腱和伸肌腱划分为不同的几个部分<sup>[25]</sup>。

### 3.1.3 骨骺

骨骺位于长骨骨骺和干骺端之间。它可使骨骼生长，仅在儿童和青少年中可见。当青春期结束、生长停止时，骨骼就会完全钙化，不可再现。骨骺是软骨内骨化的部位。



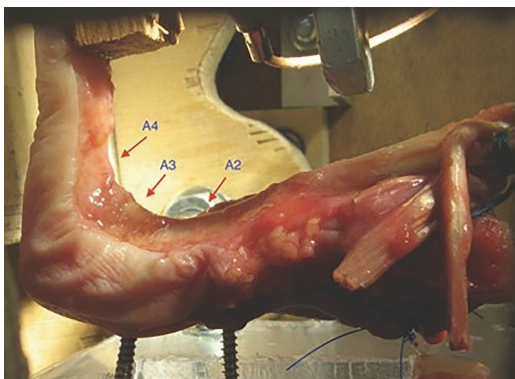


图 3.3 生物力学实验室里对完整的尸体滑车系统进行应力测试

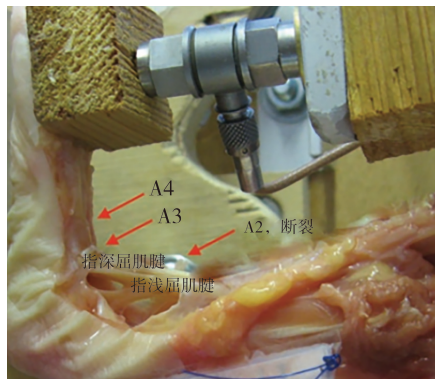


图 3.4 生物力学实验室中对一具尸体断裂的 A2 滑车进行应力测试。屈肌腱与骨骼的距离明显增加, A3 滑车和 A4 滑车完好无损

它由处于不同分化阶段的软骨细胞组成<sup>[26]</sup>。基本上其有 3 个不同的分化阶段,称为区带。静止区的软骨细胞复制速度较慢,并补充增殖性软骨细胞池<sup>[27]</sup>。增殖区的软骨细胞复制速率高,导致细胞沿着骨的长轴排列<sup>[26]</sup>。一旦细胞停止分裂,它们就会分化为肥大的软骨细胞,其高度增加 6 ~ 10 倍,构成纵向生长的主要部分<sup>[28]</sup>。肥大性软骨细胞随后会使周围的细胞外基质钙化,并在经历细胞凋亡之前产生吸引侵入的骨细胞和血管的因子,包括血管内皮生长因子<sup>[29]</sup>。

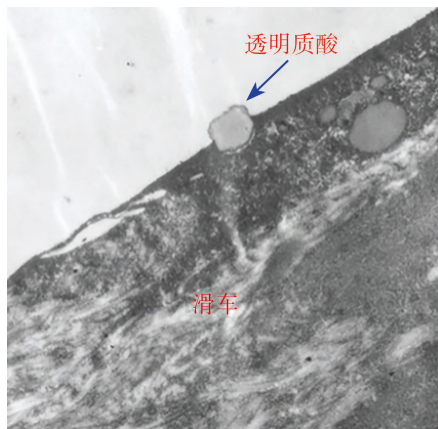


图 3.5 分泌透明质酸的滑车电子显微镜图像<sup>[1]</sup>

### 3.2 肌腱愈合

从组织学上看,肌腱由极长的胶原纤维组成,这些纤维呈束状排列。类似于绳梯,弹性纤维和血管缠绕在这些束状排列之间<sup>[30]</sup>。为了降低运动中的摩擦力,肌腱由腱外膜或腱鞘覆盖。滑车沿着指骨可加强这些腱鞘。摩擦力是肌腱、腱鞘和滑车损伤及慢性炎症性疾病的重要起因<sup>[10,11,31,32]</sup>。受伤后,愈合先从腱外膜和腱周组织开始,区分出外在和内在愈合过程<sup>[10,11,31,32]</sup>。外在愈合过程的特征是显著的炎症反应,随后是增生<sup>[10,11,31,32]</sup>和重塑<sup>[1]</sup>。腱周膜的成纤维细胞在迁移中起重要作用,这导致了粘连的形成<sup>[32-36]</sup>。内在愈合过程通过肌腱的运动得到支持,以“成纤维细胞样肌腱细胞”的迁移为特征,产生胶原组织并进行重塑过程<sup>[30,32-36]</sup>。炎症反应轻微,临床效果较好。这也是早期介入被动活动获得广泛推荐的理论依据,它有助于改善肌腱的营养状态和强度<sup>[30,32-36]</sup>。以下因素可预测肌腱愈合:年龄、整体健康状况、瘢痕形成倾向、



动机、基于 Verdan 分区的损伤风险<sup>[24]</sup>、损伤类型、滑膜包容以及手术修复技术<sup>[1,32]</sup>。肌腱愈合分为三个阶段：首先，发生外周细胞迁移和血管侵入；其次，肌腱和周围组织愈合；最后，通过肌腱的运动和功能进行重塑<sup>[37]</sup>。

肌腱在愈合 12 周后恢复承受日常生活负荷的能力；体育活动最早可在损伤后 4 个月进行。重塑过程可持续长达 12 个月<sup>[1]</sup>。

### 3.3 生物力学

#### 3.3.1 手指滑车

在攀岩过程中，抓握非常薄的岩点（扣点）通常有两种方式，即“开放式”的手指悬挂（hanging）或“封闭式”的手指扣点（crimping）的方式（图 3.6 和图 3.7）。此外，针对室内和野外的各种不同形状的岩点，还有很多不同的抓握方式。比如，在传统裂缝攀爬当中的手指锁（finger lock）、反提（undercling）、单指洞（one-finger pocket）、双指洞（two-finger pocket）、捏（pinch）和叠手指（stacked fingers）等，都是常用的手及手指抓握方法。最近，“半开放”的扣点手法（图 3.8）越来越流行，因为它对关节滑车和软骨施加的压力更小<sup>[3,13]</sup>。



图 3.6 “封闭式”扣点将高强度负荷转移到了屈肌腱滑车



图 3.7 “开放式”悬挂时，关节囊、屈肌腱、韧带被动接受高强度负荷（摄影：Kilian Reil）

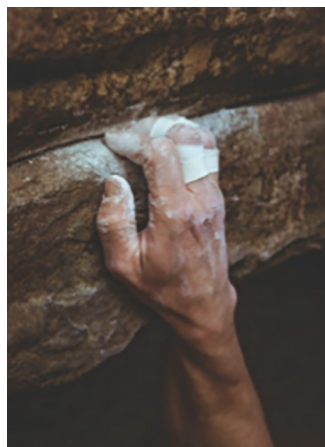


图 3.8 “半开放”扣点可以减少手指的压力（摄影：Kilian Reil）

然而，在抓握极薄的岩点时，“开放式”悬挂和“封闭式”扣点是最常见的。在“封闭式”扣点时，远端指间关节过度伸展，近端指间关节弯曲，掌指关节伸展。为了增加手指屈肌的力量，腕关节保持伸展<sup>[38]</sup>。在“开放式”悬挂时，近端指间关节、远端指间关节和掌指关节均弯曲，而手腕可以处于弯曲、中立或伸展的任何位置。“封闭式”扣点有助于在抓握非常薄的岩点时增加力量，因此受到了许多攀岩者的青睐<sup>[39]</sup>。然而，这一抓握方式会导致手指关节软骨和滑车系统的应力增加。在“开放式”悬挂中，

大部分应力转移到被动结构、肌腱、关节囊和韧带上。最近，临床上越来越多地推荐“半开放”扣点的抓握方式，因为它减少了“封闭式”扣点的高应力，同时仍能保持良好的力量<sup>[40]</sup>。另外，两种手指技术基于生物力学产生组织应力，即叠手指（图 3.9）和单指洞（另外还有双指洞）（图 3.10）。在叠手指时，会迫使掌指关节和近端指间关节及伸肌腱的肌腱结合承受剪切力。单指洞和双指洞会导致关节囊和屈肌腱承受高应力。邻近手指弯曲会产生更大的力量，可能会导致蚓状肌的“并指”效应<sup>[6,40]</sup>。



图 3.9 叠手指姿势导致中间指间关节和近端指间关节以及肌腱结合部的剪切力



图 3.10 单指洞导致关节囊和屈肌腱承受高应力，由于邻近手指弯曲，形成蚓状肌的“并指”效应（摄影：Michael Simon）

屈肌腱滑车系统的主要功能是将弯曲的肌腱固定在骨表面，将线性力转化为扭矩，从而在指间和掌指关节处产生旋转力。一个或多个滑车结构受损会导致屈肌腱与骨之间的距离增加，出现“弓弦征”，并导致力量减弱和活动度减小。图 3.11 显示了临床弓弦征，图 3.12 显示了我们在生物力学实验室中通过医源性操作造成 A2/A3/A4 滑车断裂后的尸体标本。功能缺失的临床表现取决于损伤滑车的具体情况。A2 滑车和 A4 滑车对防止弓弦征最为关键，而 A3 滑车结构较薄弱且更灵活，对屈肌腱的走向影响较小。同时，它不附着于骨面，而是附着于掌板。



图 3.11 临床中 A2/A3/A4 滑车撕裂的弓形征改变



图 3.12 生物力学实验室中的“弓弦征”改变标本





在攀爬过程中作用于滑车上的力可以通过结合解剖学观察的数学模型进行估算<sup>[13,41]</sup>（图 3.13）。滑车在接触点上偏转肌腱，因此作用在滑车上的力（ $F_p$ ）是肌腱与滑车之间的角度（ $\beta$ ）和在肌腱中产生的力（ $F_t$ ）的函数：

$$F_p = 2F_t \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

此外，指骨的宽度与肌腱的宽度之间存在相对不匹配，这会产生不同的力。

$$F_i = F_p \left[ 1 + \left( \frac{L_B - L_T}{2 \times H_T} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$F_i$  表示作用于滑车止点处的力， $L_B$  和  $L_T$  分别表示骨和肌腱的宽度， $H_T$  表示肌腱的高度。

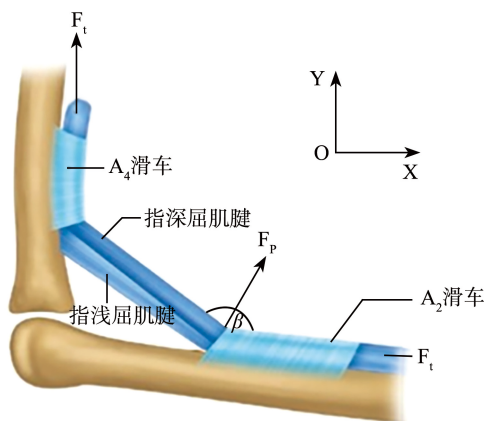


图 3.13  $\beta$  角在 A2 滑车（ $F_p$ ）上起重要作用，并且取决于近端指间关节的屈曲角度<sup>[13]</sup>

最后，滑车在受力时有一定的拉伸潜力，当滑车受力时，肌腱与滑车之间的角度会减小。因此，在建模攀爬过程中作用于滑车上的力时，需要考虑滑车的刚度<sup>[15]</sup>。

简而言之，可以得出如下结论：一旦手指弯曲，滑车与肌腱之间的角度就会减小，作用在滑车上的力就会增大。这反过来又表明，与“开放式”悬挂姿势相比，“封闭式”扣点会导致作用在滑车系统上的力增加。肌腱和骨骼宽度之间的不匹配程度越高，作用在滑车上的力就越大。

因此，近端指间关节的最大屈曲最常导致滑车断裂。这些高强度力在攀爬时会发生，在其他以“封闭式”扣点的方式使用手指的情境中也会发生（如拎起重物）<sup>[42]</sup>。近端指间关节周围的滑车（ $A_2$ 、 $A_3$  和  $A_4$ ）最容易受到影响<sup>[31]</sup>，但也有报告单个交叉滑车损伤的情况<sup>[43]</sup>。

这个角度越小，相应滑车上的受力就越大<sup>[13]</sup>。

Butcher 和 Jenny<sup>[44]</sup>通过数学分析研究了不同抓握方式的手指应力，发现当近端指间关节屈曲  $135^\circ$  时，滑车系统上的受力为 599 N。Bollen<sup>[22]</sup>的生物力学分析表明，A2 滑车上的作用力最高可达 450 N，Roloff 等的模型计算出，在“封闭式”扣点时

A4 滑车上的力为 268 N。由于作用于滑车系统作用力较高,因此需要考虑滑车的最大撕裂负荷。Lin 等<sup>[45]</sup>发现 A2 滑车的最大撕裂负荷为 400 N,而 Widstrom 等<sup>[46,47]</sup>发现为 137 N。尽管这些测量结果存在很大差异,但仍可表明,“封闭式”扣点时作用于滑车上的力应该非常接近它们在体外的生物撕裂力。如果在承受高应力的同时,攀岩者的手或脚从岩点上滑脱,那么滑车系统的生物强度就会失效。

大多数关于攀岩者滑车损伤的尸体研究采用向滑车系统施加向心力的方式,通常是通过持续牵拉滑车至其撕裂。然而,这可能并不是导致滑车撕裂的实际应力。许多曾受伤的攀岩者报告称,导致其滑车撕裂的动作多为离心收缩运动,如:手指被动伸展、因滑脚造成的滑车系统压力骤增,以及在尝试抓住岩点时肌肉力竭等情况<sup>[39,48,49]</sup>。对正常攀岩运动模式的分析表明,手臂有一个拉近的向心运动,同时肘部屈曲;但在上肢动力链的远端,近端指间关节有一个离心运动,即手指稍微张开。许多攀岩者报告称,损伤通常发生在较长时段的攀爬活动后的疲劳状态下,当试图以“封闭式”扣点姿势抓握岩点时,因力量不足无法维持手指屈曲,导致手指被迫张开,从而引发损伤<sup>[7]</sup>。因此,在进一步的尸体研究中,我们同时检测了向心与离心运动,以及“开放式”悬挂与“封闭式”扣点时的滑车断裂<sup>[10,11]</sup>。我们发现离心运动更容易导致滑车撕裂(失败负荷:离心运动 237 N,向心运动 354 N)。向心和离心加载间的差异可能是肌腱和腱鞘/滑车之间的摩擦力。对鸟类和蝙蝠的研究表明,它们的滑车内表面,朝向屈肌腱的一侧,具有更为显著粗糙结构。由于这种粗糙的内表面和屈肌肌腱间的高摩擦,这些动物可以被动地用爪子完成悬挂动作,而不需要主动的肌肉激活。人类手指滑车系统可能也存在生物力学特性<sup>[50]</sup>。

通过电子显微镜对人类滑车的检查显示出相似的模式。Schweizer<sup>[31]</sup>的一项在体研究测量了人类滑车中增加的摩擦力与滑车断裂可能的相关性。研究发现,滑车下层的摩擦对攀岩者来说是有益的,因为可以增强屈肌的力量。然而,滑车与肌腱内表面间的摩擦力增加可能是某些攀岩者比其他人更容易发生滑车损伤的原因。“粗糙”的滑车和强大的手指力量引发的高摩擦力是这类人群滑车损伤发病率更高的原因。

尽管通过数学模型估算或尸体研究测得的应力值只能部分代表实际攀爬中滑车屈肌腱系统的动态情况,这些研究清楚地表明,“封闭式”扣点时滑车的力接近其撕裂强度<sup>[7]</sup>。这就解释了为什么滑车断裂是最常见的攀岩损伤。这种在攀岩中发生的极高应力也可在日常活动中出现(如提起重物)<sup>[42]</sup>。其中,年龄最小的滑车损伤患者是一个 2.5 岁的女孩,她在玩沙盒时受伤,当时她哥哥踩到了她的手指,而她试图把手指抽出来。

滑车断裂最常见的手指是无名指,其次为中指和其他手指<sup>[7]</sup>,可以通过对该运动模式的生物力学分析进行解释。

在“封闭式”扣点时,腕关节不仅过伸,还会发生尺偏<sup>[7]</sup>。由于这种尺偏伴轻微旋前,在抓握用力时,无名指应力最大<sup>[51]</sup>。由于无名指的力量弱于中指和示指,其力矩增





加了滑车的压力和损伤风险<sup>[52]</sup>。此外，毗邻的小指通常比无名指短得多，因此对无名指的支持很少。示指受伤的情况非常少，可能是旋前过程中示指的应力较小。在所有手指都参与“封闭式”扣点时，中指两侧有无名指和示指支撑，放在示指上的拇指可以对示指辅助支撑，而无名指没有任何支撑。中指的滑车损伤常发生在仅用两指抓握时<sup>[53]</sup>。

### 3.3.2 骨骺

骨骺损伤此前已在其他运动中（涉及不同身体部位）有过相关报道。第一例是在年轻棒球运动员的肱骨近端骨骺上观察到的，并被称为“小联盟球员肩”<sup>[54-56]</sup>。这种损伤被认为是投球时手臂挥鞭样动作的结果<sup>[57]</sup>。反复投掷会导致骺板变宽，就像 Salter Harris I 型骨折一样<sup>[57]</sup>。因此，棒球运动损伤导致的大多数骨骺骨折都是 Salter Harris I 型骨折<sup>[55,56]</sup>。在揭示棒球运动中骨骺的损伤是慢性损伤之后，又发现了体操运动员的桡骨远端应力性骨折<sup>[58-60]</sup>。其发病机制被认为是复杂的旋转跳跃<sup>[58,61]</sup>。基于这种损伤机制，最常观察到的损伤是 Salter Harris II 应力性骨折，伴有骨骺变宽、骨骺端不规则和囊性改变<sup>[58,59,61]</sup>。攀岩界在 1997 年<sup>[62]</sup>和 1999 年<sup>[63]</sup>才开始报道手指骺端应力骨折。由于手指反复承受负荷，观察到的骨折总是发生在近端指间关节处<sup>[62]</sup>。最常见的是 Salter Harris III 型骨折，伴中节指骨骨骺骨折<sup>[64]</sup>。

骨骺骨折的共同特征为反复承受负荷。由于骺板没有直接的血液供应，只有骨骺和干骺端血管以及软骨环膜和骨膜血管的供血<sup>[65]</sup>，反复承受负荷可以改变干骺端的灌注，从而干扰肥大软骨细胞的矿化<sup>[66]</sup>。随着生发区和增殖区不断生长，肥大区也随之扩大。通常来说，骨骺板的这种增宽只是暂时的，因为骨骺的静止和分裂状态以及随之而来的骨骺和干骺端血液供应基本上没有受到干扰。如果反复承受过重负荷而出现缺血，则可引起发育中的骨化中心的骨性坏死和畸形，从而导致骨骺的不规则生长。这些改变可导致局部的非对称生长，或因整个骺板受累而引起生长速度整体减慢，甚至出现生长停滞<sup>[67]</sup>。

骨骺在快速生长期，尤其是青春期的生长突增时期<sup>[68-71]</sup>，似乎极易受伤。动物研究<sup>[72]</sup>和临床研究<sup>[73]</sup>均表明，青春期期间，骨骺软骨的强度会降低。这种强度的下降是快速生长期结构变化的结果，导致骨骺更厚、更脆弱，骨矿化滞后于线性生长，使骨骼更具多孔性<sup>[74]</sup>。此外，剪切阻力取决于基质和胶原蛋白的含量。肥大区细胞的增加减少了可用来抵抗剪切阻力的基质数量，因此其可用来预测脆性的增加<sup>[75]</sup>。

纵向骨生长过程是由复杂的神经内分泌调控的，包括生长激素、胰岛素样生长因子 I、糖皮质激素、甲状腺激素、雌激素、雄激素、维生素 D 和瘦素（Leptin）<sup>[26]</sup>。然而，不同的激素水平对骨骺骨折的风险影响程度存疑，且迄今尚未得到验证。

关于因生长突增导致关节周围肌肉肌腱紧张程度增加是否会对骨骺造成过度肌肉应力，在文献中尚存争议<sup>[71,76,77]</sup>。

手指骨骺骨折这种损伤的机制源于“封闭式”扣点对近端指间关节的高反复性应

力（图 3.6）<sup>〔64,78〕</sup>。在这种抓握方式下，骨骺既要承受来自指尖的压力，又要承受屈肌收缩的压力。当手指屈曲到最大程度时，这种压力分布是不均匀的，对骨骺的背侧会施加更大的力（图 3.14）。这反过来又会导致骨折线穿过骨骺的背侧以及骺端。这种压力在指力条训练中尤其明显，在这种训练中，运动员在脚离地的情况下进行攀爬动作，从而使手指承受全身重量。一项调查顶级攀岩者手指 X 射线变化的研究显示，只有那些进行指力条训练的攀岩者才会发生骨关节变化<sup>〔79,80〕</sup>。

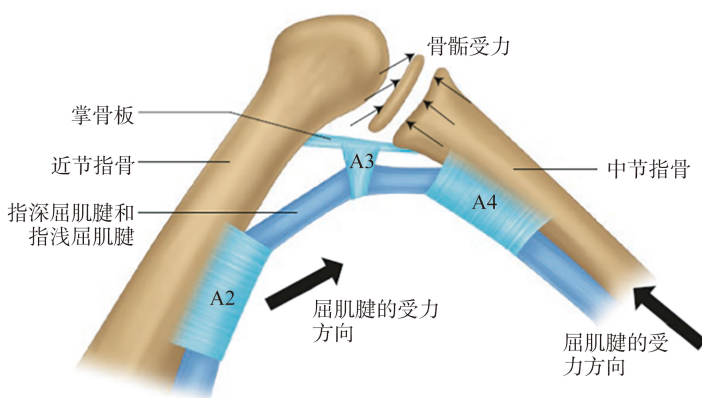


图 3.14 在“封闭式”扣点时作用于手指骨骺的力，其中来自指间一侧和屈肌另一侧的力共同作用，导致骨骺承受压力

### 3.4 结论

攀岩者常用的“封闭式”扣点是一个非常特殊的手指抓握姿势，其中近端指间关节屈曲超过  $90^\circ$ ，而远端指间关节过度伸展，导致屈肌腱鞘的滑车承受超高负荷，比指尖承受高出 3 ~ 4 倍的力<sup>〔81〕</sup>。此外，屈肌腱和滑车之间存在的摩擦力<sup>〔10,31〕</sup>也提高了对滑车断裂的病理机制的理解，这种机制主要发生在离心运动中<sup>〔10〕</sup>。青春期快速生长的青少年最易因近端指尖关节背侧受力过大而导致骨骺损伤。骨骺受损可能引发严重的手指损伤，生长错位或完全停止生长。指力条训练和“封闭式”扣点的抓握姿势是造成骨骺损伤的主要原因。

### 原著参考文献

- 〔1〕 Schöffl V, Heid A, Küpper T. Tendon injuries of the hand. *World J Orthop.* 2012;3(6):62-9.
- 〔2〕 Straub G. Anatomie und Biomechanik der Hand und Finger. In: Schöffl V und Hochholzer, T., editor. *Sportklettern—Aktuelle sportmedizinische Aspekte.* 1. Ebenhausen: Lochner Verlag; 2004. p. 134-144.
- 〔3〕 Schöffl V, Schöffl I, Frank L, Küpper T, Simon M, Lutter C. Tendon injuries in the hands in rock climbers: epidemiology, anatomy, biomechanics and treatment—an update. *Muscles Ligaments Tendons J.* 2020;10:233-43.
- 〔4〕 Lutter C, Schweizer A, Schöffl V, Römer F, Bayer T. Lumbrical muscle tear: clinical presentation,



imaging findings and outcome. J Hand Surg Eur. 2018;43(7):767-75.

- [ 5 ] Schöffl V, Winkelmann HP. [Traumatic and degenerative tendon lesions of the hand]. Der Orthopäde 2010;39(12):1108-1116.
- [ 6 ] Schweizer A. Lumbrical tears in rock climbers. J Hand Surg (Br). 2003;28(2):187-9.
- [ 7 ] Schöffl V, Schöffl I. Injuries to the finger flexor pulley system in rock climbers—current concepts. J Hand Surg [Am]. 2006;31(4):647-54.
- [ 8 ] Doyle JR. Anatomy of the finger flexor tendon sheath and pulley system. J Hand Surg [Am]. 1988;13(4):473-84.
- [ 9 ] Hahn P, Lanz U. [Flexor pulleys of the fingers. Anatomy, biomechanics, reconstruction] Die Ringbänder der Fingerbeugeschnen. Anatomie, Biomechanik, Wiederherstellung. Handchir Mikrochir Plast Chir. 1996;28(5):265-70.
- [ 10 ] Schöffl I, Oppelt K, Jungert J, Schweizer A, Bayer T, Neuhuber W, et al. The influence of concentric and eccentric loading on the finger pulley system. J Biomech. 2009;42(13):2124-8.
- [ 11 ] Schöffl I, Oppelt K, Jungert J, Schweizer A, Neuhuber W, Schöffl V. The influence of the crimp and slope grip position on the finger pulley system. J Biomech. 2009; 42(13):2183-7.
- [ 12 ] Manske PR, Lesker PA. Strength of human pulleys. Hand. 1977;9(2):147-52.
- [ 13 ] Roloff I, Schöffl VR, Vigouroux L, Quaine F. Biomechanical model for the determination of the forces acting on the finger pulley system. J Biomech. 2006;39(5):915-23.
- [ 14 ] An KN, Berglund L, Uchiyama S, Coert JH. Measurement of friction between pulley and flexor tendon. Biomed Sci Instrum. 1993;29:1-7.
- [ 15 ] Lin GT, Cooney WP, Amadio PC, An KN. Mechanical properties of human pulleys. J Hand Surg (Br). 1990;15(4):429-34.
- [ 16 ] Lin GT, Amadio PC, An KN, Cooney WP. Functional anatomy of the human digital flexor pulley system. J Hand Surg [Am]. 1989;14(6):949-56.
- [ 17 ] Doyle JR. Anatomy of the flexor tendon sheath and pulley system: a current review. J Hand Surg [Am]. 1989;14(2 Pt 2):349-51.
- [ 18 ] Marco RA, Sharkey NA, Smith TS, Zissimos AG. Pathomechanics of closed rupture of the flexor tendon pulleys in rock climbers. J Bone Joint Surg Am. 1998;80(7):1012-9.
- [ 19 ] Rispler D, Greenwald D, Shumway S, Allan C, Mass D. Efficiency of the flexor tendon pulley system in human cadaver hands. J Hand Surg [Am]. 1996;21(3):444-50.
- [ 20 ] Hamman J, Ali A, Phillips C, Cunningham B, Mass DP. A biomechanical study of the flexor digitorum superficialis: effects of digital pulley excision and loss of the flexor digitorum profundus. J Hand Surg [Am]. 1997;22(2):328-35.
- [ 21 ] Zao CF, Amadio PC, L.B.K. A. The A3 pulley. J Hand Surg [Am]. 2000;25:270-6.
- [ 22 ] Bollen SR. Injury to the A2 pulley in rock climbers. J Hand Surg (Br). 1990;15(2):268-70.
- [ 23 ] Bowers WH, Wolf JW Jr, Nehil JL, Bittinger S. The proximal interphalangeal joint volar plate. I. An anatomical and biomechanical study. J Hand Surg [Am]. 1980;5(1):79-88.
- [ 24 ] Verdan CE. Primary and secondary repair of flexor and extensor tendon injuries. In: Flynn JE, editor. Hand surgery. Baltimore: Williams & Willkins; 1966. p. 220-42.
- [ 25 ] Voigt C. Sehnenverletzungen an der Hand. Chirurg. 2002;73:744-67.



- [ 26 ] Nilsson O, Marino R, De Luca F, Phillip M, Baron J. Endocrine regulation of the growth plate. *Horm Res.* 2005;64(4):157-65.
- [ 27 ] Abad V, Meyers JL, Weise M, Gafni RI, Barnes KM, Nilsson O, et al. The role of the resting zone in growth plate chondrogenesis. *Endocrinology.* 2002;143(5):1851-7.
- [ 28 ] Hunziker EB. Mechanism of longitudinal bone growth and its regulation by growth plate chondrocytes. *Microsc Res Tech.* 1994;28(6):505-19.
- [ 29 ] Gerber HP, Vu TH, Ryan AM, Kowalski J, Werb Z, Ferrara N. VEGF couples hypertrophic cartilage remodeling, ossification and angiogenesis during endochondral bone formation. *Nat Med.* 1999;5(6):623-8.
- [ 30 ] Werdin F, Schaller HE. [Combined flexor tendon and nerve injury of the hand]. *Der Orthopade.* 2008;37(12):1202-1209.
- [ 31 ] Schweizer A, Frank O, Ochsner PE, Jacob HA. Friction between human finger flexor tendons and pulleys at high loads. *J Biomech.* 2003;36(1):63-71.
- [ 32 ] Taras JS, Gray RM, Culp RW. Complications of flexor tendon injuries. *Hand Clin.* 1994;10(1):93-109.
- [ 33 ] Boyer MI, Strickland JW, Engles D, Sachar K, Leversedge FJ. Flexor tendon repair and rehabilitation: state of the art in 2002. *Instr Course Lect.* 2003;52:137-61.
- [ 34 ] Strickland JW. The scientific basis for advances in flexor tendon surgery. *J Hand Ther.* 2005;18(2):94- 110; quiz 1.
- [ 35 ] Choueka J, Heminger H, Mass DP. Cyclical testing of zone II flexor tendon repairs. *J Hand Surg [Am].* 2000;25(6):1127-34.
- [ 36 ] Stein T, Ali A, Hamman J, Mass DP. A randomized biomechanical study of zone II human flexor tendon repairs analyzed in a linear model. *J Hand Surg [Am].* 1998;23(6):1043-5.
- [ 37 ] Werber KD. Beugeschnenverletzungen der Hand. *Unfallchirurg.* 2005;108(10):873-82.
- [ 38 ] Schöffl V, Schweizer A. Sportclimbing related injuries and overuse syndromes. In: Seifert L, Wolf P, Schweizer A, editors. *IRCRA handbook of climbing & mountaineering from science to performance. Research in sport and exercise science.* London, New York: Routledge; 2016. p. 59-75.
- [ 39 ] Schöffl V, Hochholzer T, Winkelmann HP, Strecker W. Pulley injuries in rock climbers. *Wilderness Environ Med.* 2003;14(2):94-100.
- [ 40 ] Schöffl V, Schöffl I, Hochholzer T, Lutter C. *Klettermedizin—Grundlagen, Unfälle. Verletzungen und Therapie:* Springer; 2020.
- [ 41 ] Hume EL, Hutchinson DT, Jaeger SA, Hunter JM. Biomechanics of pulley reconstruction. *J Hand Surg [Am].* 1991;16(4):722-30.
- [ 42 ] Schöffl V, Jüngert J. Closed flexor pulley injuries in non-climbing activities. *J Hand Surg [Am].* 2006;31(5):806-10.
- [ 43 ] Schöffl V, Schöffl I. Isolated cruciate pulley injuries in rock climbers. *J Hand Surg Eur.* 2010;35(3):245-6.
- [ 44 ] Burtscher M, Jenny E. Häufigste trainingsbedingte Beschwerden und Verletzungen bei Sportkletterern. *Prakt Sport Trauma Sportmed.* 1987;2:15-21.
- [ 45 ] Lin GT, Amadio PC, An KN, Cooney WP, Chao EY. Biomechanical analysis of finger flexor pulley



reconstruction. J Hand Surg (Br). 1989;14(3):278-82.

- [ 46 ] Widstrom CJ, Doyle JR, Johnson G, Manske PR, McGee R. A mechanical study of six digital pulley reconstruction techniques: Part II . Strength of individual reconstructions. J Hand Surg [Am]. 1989;14(5):826-9.
- [ 47 ] Widstrom CJ, Johnson G, Doyle JR, Manske PR, Inhofe P. A mechanical study of six digital pulley reconstruction techniques: Part I. Mechanical effectiveness. J Hand Surg [Am]. 1989;14(5):821-5.
- [ 48 ] Gabl M, Rangger C, Lutz M, Fink C, Rudisch A, Pechlaner S. Disruption of the finger flexor pulley system in elite rock climbers. Am J Sports Med. 1998;26(5):651-5.
- [ 49 ] Moutet F. [Flexor tendon pulley system: anatomy, pathology, treatment]. Chir Main. 2003;22(1):1-12.
- [ 50 ] Haffner M. A tendon-locking mechanism in two climbing rodents, Muscardinus avellanarius and Micromys minutus (Mammalia, Rodentia). J Morphol. 1996;229(2):219-27.
- [ 51 ] Schöffl V, Hochholzer T, Winkelmann HP, Roloff I, Strecker W. [Pulley injuries in sport climbers] Verletzungen des Ringbandapparates bei Sportkletterern. Handchir Mikrochir Plast Chir. 2004;36(4):224-30.
- [ 52 ] Quaine F, Vigouroux L, Martin L. Effect of simulated rock climbing finger postures on force sharing among the fingers. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2003;18(5):385-8.
- [ 53 ] Schöffl V, Hochholzer T, Winkelmann HP, Strecker W. [Therapy of injuries of the pulley system in sport climbers] Zur Therapie von Ringbandverletzungen bei Sportkletterern. Handchir Mikrochir Plast Chir. 2004;36(4):231-6.
- [ 54 ] Dotter WE. Little leaguer's shoulder: a fracture of the proximal epiphysial cartilage of the humerus due to baseball pitching. Guthrie Clin Bull. 1953;23(1):68-72.
- [ 55 ] Carson WG Jr, Gasser SI. Little Leaguer's shoulder. A report of 23 cases. Am J Sports Med. 1998;26(4):575-80.
- [ 56 ] Rettig AC, Wurth TR, Mieling P. Nonunion of olecranon stress fractures in adolescent baseball pitchers: a case series of 5 athletes. Am J Sports Med. 2006;34(4):653-6.
- [ 57 ] Adams JE. Little league shoulder: osteochondrosis of the proximal humeral epiphysis in boy baseball pitchers. Calif Med. 1966;105(1):22-5.
- [ 58 ] Read MT. Stress fractures of the distal radius in adolescent gymnasts. Br J Sports Med. 1981;15(4):272-6.
- [ 59 ] Carter SR, Aldridge MJ, Fitzgerald R, Davies AM. Stress changes of the wrist in adolescent gymnasts. Br J Radiol. 1988;61(722):109-12.
- [ 60 ] Roy S, Caine D, Singer KM. Stress changes of the distal radial epiphysis in young gymnasts. A report of twenty-one cases and a review of the literature. Am J Sports Med. 1985;13(5):301-8.
- [ 61 ] Bak K, Boeckstyns M. Epiphysiodesis for bilateral irregular closure of the distal radial physis in a gymnast. Scand J Med Sci Sports. 1997;7(6):363-6.
- [ 62 ] Hochholzer T, Schöffl V, Krause R. Finger-Epiphysenverletzungen jugendlicher Sportkletterer. Sport Ortho Trauma. 1997;13(2):100-3.
- [ 63 ] Chell J, Stevens K, Preston B, Davis TR. Bilateral fractures of the middle phalanx of the middle finger in an adolescent climber. Am J Sports Med. 1999;27(6):817-9.
- [ 64 ] Hochholzer T, Schöffl V, Bischof B.[Epiphyseal fractures of the middle phalanx in sportclimbers]

- Epiphysenfrakturen der Fingermittelgelenke bei Sportkletterern. *Sport Ortho Trauma*. 2002;18:87-92.
- [ 65 ] Lipp EJ. Athletic physeal injury in children and adolescents. *Orthop Nurs*. 1998;17(2):17-22.
- [ 66 ] Caine D, DiFiori J, Maffulli N. Physeal injuries in children's and youth sports: reasons for concern? *Br J Sports Med*. 2006;40(9):749-60.
- [ 67 ] Laor T, Wall EJ, Vu LP. Physeal widening in the knee due to stress injury in child athletes. *AJR*. 2006;186(5):1260-4.
- [ 68 ] Flachsman R, Broom ND, Hardy AE, Moltschaniwskyj G. Why is the adolescent joint particularly susceptible to osteochondral shear fracture? *Clin Orthop Relat Res*. 2000;381:212-21.
- [ 69 ] Bailey DA, McKay HA, Mirwald RL, Crocker PR, Faulkner RA. A six-year longitudinal study of the relationship of physical activity to bone mineral accrual in growing children: the university of Saskatchewan bone mineral accrual study. *J Bone Miner Res*. 1999;14(10):1672-9.
- [ 70 ] DiFiori JP, Mandelbaum BR. Wrist pain in a young gymnast: unusual radiographic findings and MRI evidence of growth plate injury. *Med Sci Sports Exerc*. 1996;28(12):1453-8.
- [ 71 ] Micheli LJ. Overuse injuries in children's sports: the growth factor. *Orthop Clin North Am*. 1983;14(2):337-60.
- [ 72 ] Bright RW, Burstein AH, Elmore SM. Epiphyseal-plate cartilage. A biomechanical and histological analysis of failure modes. *J Bone Joint Surg*. 1974;56(4):688-703.
- [ 73 ] Morscher E. Strength and morphology of growth cartilage under hormonal influence of puberty. Animal experiments and clinical study on the etiology of local growth disorders during puberty. *Reconstr Surg Traumatol*. 1968;10:3-104.
- [ 74 ] Bailey DA, Wedge JH, McCulloch RG, Martin AD, Bernhardson SC. Epidemiology of fractures of the distal end of the radius in children as associated with growth. *J Bone Joint Surg*. 1989;71(8):1225-31.
- [ 75 ] Alexander CJ. Effect of growth rate on the strength of the growth plate-shaft junction. *Skelet Radiol*. 1976;1:67-76.
- [ 76 ] Feldman D, Shrier I, Rossignol M, Abenham L. Adolescent growth is not associated with changes in flexibility. *Clin J Sport Med*. 1999;9(1):24-9.
- [ 77 ] Connolly SA, Connolly LP, Jaramillo D. Imaging of sports injuries in children and adolescents. *Radiol Clin N Am*. 2001;39(4):773-90.
- [ 78 ] Hochholzer T, Schöffl VR. Epiphyseal fractures of the finger middle joints in young sport climbers. *Wilderness Environ Med*. 2005;16(3):139-42.
- [ 79 ] Schöffl VR, Hoffmann PM, Imhoff A, Küpper T, Schöffl I, Hochholzer T, et al. Long-term radiographic adaptations to stress of high-level and recreational rock climbing in former adolescent athletes: an 11-year prospective longitudinal study. *Orthop J Sports Med*. 2018;6(9):2325967118792847.
- [ 80 ] Schöffl VR, Hochholzer T, Imhoff AB, Schöffl I. Radiographic adaptations to the stress of high-level rock climbing in junior athletes: a 5-year longitudinal study of the German Junior National Team and a group of recreational climbers. *Am J Sports Med*. 2007;35(1):86-92.
- [ 81 ] Schweizer A. Biomechanical properties of the crimp grip position in rock climbers. *J Biomech*. 2001;34(2):217-23.