

髌股关节的解剖及生物力学特征

尹力¹, 曾伟南^{1,2}, 刘金标¹, 王财儒¹, 崔琳¹, 谢庆云¹, 王维¹, 陈松¹, 邓冰¹ (通信作者)

(1 中国人民解放军西部战区总医院骨科 四川 成都 610083)

(2 四川大学华西医院骨科 四川 成都 610041)

【摘要】髌股关节是人体最大的滑车关节, 其在伸膝的力学传导及增强下肢运动能力中至关重要。髌股关节由骨软骨界面结构、韧带支持结构、肌肉动力结构等构成。这些结构协同构成了髌股关节的功能, 并共同参与维持髌骨运动轨迹的稳定。单个或多个结构的异常将造成髌股关节生物力学机制的失衡, 最终产生髌股关节疼痛、髌骨不稳定等疾病。本综述拟从解剖构成、生物力学两个方面对髌股关节进行阐述。

【关键词】髌骨; 髌股关节; 滑车; 膝关节; 伸膝装置; 解剖; 生物力学; 髌股关节痛; 髌骨不稳

【中图分类号】R684

【文献标识码】A

【文章编号】2095-1752 (2023) 05-0130-03

髌股关节疼痛 (patellofemoral pain, PFP) 是膝关节运动医学中的常见疾病, 其在运动活跃的年轻人中较为常见。PFP 主要表现为膝前及环髌骨区域的疼痛, 它的起病多为慢性而渐进发展, 在下肢进行高负荷运动时 (例如下蹲、上下梯阶、跑、跳等) 症状加重。PFP 的具体病因尚未完全明确, 多数学者认为其与髌股关节的解剖和力学机制失调相关^[1]。从生物力学的角度来说, 髌股关节是人体最复杂的大关节之一^[2]。本文拟就髌股关节的解剖和力学特征进行综述。

1 解剖

髌股关节是一个包含了多个动力和静力结构的复杂关节。静力结构包括髌骨本身、股骨滑车关节、髌腱、内外侧髌骨支持带、内侧髌骨韧带等。直接的动力结构主要涉及股四头肌的四组肌肉 (股直肌、股中间肌、股外侧肌和股内侧肌); 然而由于胫骨和股骨在膝关节屈伸过程中的位置并非恒定的, 尤其是存在着一定的轴线旋转, 进而改变了髌腱的牵引方向, 因此髌腱在一定程度上来说也可算作半动力结构^[3]。

1.1 关节面

①髌骨。髌骨是人体最大的籽骨, 整体略呈三角形, 其后大部分被软骨覆盖^[4]。正常髌骨的长度约 4.5 cm (范围 3.8 ~ 5.3 cm), 宽 4.7 cm (4 ~ 5.5 cm), 厚 2.3 cm (1.9 ~ 2.6 cm)。髌骨后方的关节面存在一条纵行走行的嵴, 将关节面分为内侧面与外侧面, 该嵴同时出现在关节软骨与软骨下骨面上^[5]。髌骨的软骨也是人体关节中厚度最高的, 最厚处可达 7 mm, 平均可达 (4.1 ± 1.3) mm^[6]。髌骨仅有上 2/3 的区域被软骨覆盖, 而其远端仅作为髌腱的附着区域。②股骨滑车。股骨滑车由股骨远端的前方关节面构成, 包括股骨外侧髁、股骨内侧髁以及中央的滑车沟。股骨滑车全部由软骨覆盖, 软骨厚度约 2 ~ 3 mm。滑车沟内的软骨比双侧股骨髁更厚, 而外侧关节面的软骨又较内侧更厚^[7]。从冠状面上看, 滑车的外侧关节面较内侧关节面向近端延伸更多; 从横

断面上看, 外侧关节面更高且更长。滑车沟向远端逐渐加深, 并最终在髌间窝的位置分离为内、外侧髌关节面。股骨滑车是屈膝中期维持髌骨稳定性的主要结构, 尤其是外侧关节面。如果股骨外侧髁发育的过于低、滑车沟过浅且平, 则髌骨外向不稳的可能性会增加^[8]。

1.2 韧带

髌骨的周围被坚强的软组织包裹固定。髌骨位于深筋膜以下, 其近端被宽大的股四头肌腱附着, 远端的下极与髌腱紧密连接。股四头肌腱与髌腱的纤维相连, 覆盖在髌骨的浅层形成一层致密的髌前腱膜。在髌骨的两侧, 髌前腱膜的纤维与两侧髌骨支持带相混合。髌骨周围致密而坚强的腱性组织覆盖形成了髌骨运动的软组织稳定结构^[4]。①髌腱。髌腱又被称作髌韧带, 其起始于髌骨下极, 向远端延伸并止于胫骨结节。其后与胫骨及膝关节腔的间隙由肥厚的脂肪组织填充, 称髌下脂肪垫。髌腱将髌骨的牵引力向远端传导至胫骨。髌腱的平均长度为 4.6 cm (3.5 ~ 5.5 cm), 与髌骨长轴的长度接近; 宽度一般在 24 ~ 33 mm^[9]。髌腱构成了髌骨远端的稳定结构。髌腱过长或过短将会分别导致高位髌骨或低位髌骨, 严重影响髌骨的稳定性及力学传导性能。②内侧髌股韧带。内侧髌股韧带 (medial patellofemoral ligament, MPFL) 起于股骨内上髁的后上方, 以宽大的止点至于髌骨的内侧面, 并与股四头肌纤维相混合, 整体形成一个近似“帆船”外观。MPFL 平均长度约 59 mm, 宽度约 12 mm, 厚度约 0.44 mm。有学者认为 MPFL 可分为两束——上斜束和下直束, 其可能在髌骨的动力和静态稳定性中具有不同的作用^[10]。MPFL 构成膝内侧软组织三层结构中的中间层。由浅至深, 分别包括浅筋膜、MPFL 与髌骨内侧支持带以及内侧副韧带浅层、关节囊与内侧副韧带深层 3 个结构^[11]。在屈膝的早期 (0 ~ 20°), 髌股关节骨性的稳定性尚未建立, MPFL 是限制髌骨活动最重要的结构, 起到了约 50% ~ 60% 的作用^[12]。③外侧髌股韧带。相比 MPFL, 外侧髌股韧带 (lateral

patellofemoral ligament, LPFL) 受到的关注较少。LPFL 连接股骨外髌与髌骨外侧面, 主要限制髌骨的内向脱位。关于 LPFL 的具体解剖目前仍存在一定争论。一些学者认为 LPFL 属于膝关节外侧关节囊的增厚部分, 在股骨外上髌和髌骨之间可以触及^[13]; 而另一些学者则认为其与 MPFL 类似, 属于囊外结构^[14]。

1.3 肌肉

股四头肌位于髌骨的近端, 是人体最大的伸肌。股四头肌由四块肌肉组成, 依次为股直肌、股外侧肌、股中间肌和股内侧肌。在对伸膝作用力的贡献上, 股外侧肌、股中间肌和股内侧肌约占 80% 的比重, 而股直肌占 20%。对于髌股关节来说, 股内侧肌的作用最为重要。股内侧肌根据肌纤维走行的方向又可以分为 2 束。其中股内侧肌长束 (vastus medialis longus, VML) 在内侧与股四头肌腱呈 $15 \sim 18^\circ$ 的夹角, 而股内侧肌斜束 (vastus medialis oblique, VMO) 则成角约 $50 \sim 55^\circ$ 。VMO 由于其斜行的走行对髌骨提供内向的牵引力, 是抵抗髌骨外向脱位的主要动力结构。股外侧肌提供类似的髌骨内向的动力稳定作用^[15]。

2 生物力学

髌股关节的重要生物力学作用是通过增大力臂的方式提高整个伸膝装置对胫骨作用力的传导的效率。尤其是在膝关节接近伸直的状态, 髌骨对于提升伸膝力臂的作用非常明显。伸膝装置包括股四头肌、髌股界面、髌腱、胫骨结节以及前述的髌骨周围软组织支持结构。其中髌股界面是其中的核心要素^[16]。

2.1 髌股关节的运动

髌股关节的运动主要是髌骨在屈伸膝过程中相对股骨滑车产生的滑动及一些自身的旋转、内外翻等运动, 又常被称作髌骨轨迹。以髌骨在伸膝位时的位置作为起始位置, 此时髌骨受到的外力最小, 对于正常高度的髌骨来说, 此时其处于滑车沟的近端, 尚未与滑车关节面发生接触, 而股四头肌腱及髌腱此时亦处在松弛状态。起始位置的髌骨相对滑车沟来说往往处在轻度偏外的位置。在屈膝 $15^\circ \sim 20^\circ$ 左右, 髌骨关节面开始与滑车关节面相接触。在屈膝 30° 左右, 髌骨已与滑车形成稳定的关节。在屈膝 90° 以后, 髌骨逐渐离开滑车沟并进入髌间窝前方, 此时与两侧的股骨髌形成关节。在髌骨关节运动的整个过程中, 髌骨沿着滑车及股骨髌的曲面进行滑动, 并在矢状面上发生旋转, 称为屈曲。髌骨屈曲的角度大约为同时膝关节屈曲角度的 $60\% \sim 70\%$ ^[17]。髌骨的平移主要发生在屈膝的起始阶段, 此时髌骨会从相对偏外的初始位置向内移动, 以为下步进入滑车沟做准

备; 在屈膝 $30^\circ \sim 90^\circ$ 的过程中, 髌骨的轨迹受到滑车骨性结构的制约, 有学者认为此过程中发生轻度的外向移动^[18]。关于髌骨的倾斜 (或内外翻), 即其围绕着长轴的旋转, 既往的研究存在着较大差异。一些研究认为髌骨在屈膝的早中期发生轻度的外倾 (即髌骨的外侧缘向靠近股骨外髌的方向转动), 在 90° 后的屈膝中发生轻度的内倾^[17, 19]。关于髌骨的旋转, 即其围绕着前-后方向轴线的旋转, 既往报道的差异也较大。一般来说在屈膝的早期 ($10^\circ \sim 15^\circ$) 髌骨可能发生轻度的内旋 (即髌骨远端向内移动), 而后发生持续的外旋, 但旋转的程度都不显著 ($5^\circ \sim 10^\circ$)。总之, 髌骨在膝关节屈膝过程中的运动以跟随滑车沟的滑动为主, 屈曲为最明显的运动, 而生理性的内外移、内外翻、内外旋等相比之下均不显著^[17, 19-20]。

2.2 髌股关节的接触面

对于正常高度的髌骨来说, 其在膝关节伸直时位于滑车沟的近端, 此时髌股关节并没有实质的接触面产生。随着屈膝到 $10^\circ \sim 15^\circ$ 左右, 髌骨的下方关节面开始与滑车的近端相接触。随着屈膝角度的增大, 髌股关节的接触面积也逐渐增大, 接触区域在髌骨上也不断上移。当屈膝 90° 时, 髌骨关节面的上部已经开始与滑车相接触了。在 90° 以后, 髌骨逐渐移动出滑车沟, 开始与股骨的内外侧髌相接触, 故接触面也由一个整体转变为内、外两个独立的区域。接触面在髌骨的内、外侧关节面上的分布是不对等的。有研究显示接触面在外侧关节面上的面积较内侧大约 60% ^[21]。髌股关节的接触面积在屈膝 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的区间内逐渐增大, 在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 时达到最大, 约增大了 4 倍。在屈膝 90° 以后接触面分为 2 个之后, 其总面积会出现轻度的下降。然而此时由于股四头肌腱开始与滑车相接触, 如果列入腱-骨接触的面积, 整个伸膝装置的接触面积仍是增加的。有学者发现在屈膝 120° 时, 股四头肌腱与股骨滑车的接触面积可以达到髌骨与股骨髌接触面积的 75% ^[21]。

2.3 髌股关节的接触应力

接触应力可以理解为单位面积上的接触力大小。髌股关节的接触力由股四头肌以及髌腱的牵引合力构成, 指向与关节面垂直的方向。在 $0 \sim 90^\circ$ 区间内, 接触力随着屈膝角度的增加而增大, 在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 的区间内达到最大^[22]。然而, 在这个过程中, 髌股关节的接触面积也在增大, 这一定程度上抵消了接触力的增大程度, 使得接触应力增加的幅度明显降低, 这在一定程度上保护了髌股关节的软骨^[21, 23]。在屈膝 90° 以后, 股四头肌腱与股骨滑车的接触实际上也参与了对接触力的调节与分

配。髌股关节是人体承受负荷最大的关节，股四头肌肉所承受的载荷可高达3 200 N（牛顿，1 N = 0.1 Kg），而髌腱可达2 800 N，这些数值基本是人体体重的4~5倍^[4]。髌骨具有人体最厚的软骨，可能也与其高强度的力学环境相适应。

3 总结

髌股关节是人体中承受负荷最大的关节，在伸膝的力学传导、增强下肢的运动功能中作用关键。髌股关节的解剖极为复杂，每个解剖结构均在最终的功能构成中起到重要作用，且相互协同。由骨性结构、韧带结构构成的静态结构和股四头肌、髌腱等动态/半动态解剖共同维持髌骨运动的稳定性。髌股关节疼痛、髌骨不稳等疾病的产生往往与单个或多个结构的解剖异常及功能失调相关，其中很多复杂的机制尚未完全清楚。随着未来对髌股关节认识的不断深入，上述疾病的治疗也能逐步实现个体化和精准化。

【参考文献】

- [1] GAITONDE D Y, ERICKSEN A, ROBBINS R C. Patellofemoral pain syndrome [J]. *Am Fam Physician*, 2019,99(2): 88-94.
- [2] BAUMANN C A, HINCKEL B B, TANAKA M J. Update on patellofemoral anatomy and biomechanics [J/OL]. *Oper Tech Sports Med*, 2019,27(4): 150683. <https://doi.org/10.1016/j.otsm.2019.150683>.
- [3] ZHANG L K, WANG X M, NIU Y Z, et al. Relationship between patellar tracking and the screw-home mechanism of tibiofemoral joint [J]. *Orthop Surg*, 2016,8(4): 490-495.
- [4] FOX A J S, WANIVENHAUS F, RODEO S A. The basic science of the patella: structure, composition, and function [J]. *J Knee Surg*, 2012,25(2): 127-141.
- [5] STAEUBLI H U, BOSSHARD C, PORCELLINI P, et al. Magnetic resonance imaging for articular cartilage: cartilage-bone mismatch [J]. *Clin Sports Med*, 2002,21(3): 417-433,viii-ix.
- [6] SAAVEDRA M Á, NAVARRO-ZARZA J E, VILLASEÑOR-OVIES P, et al. Clinical anatomy of the knee [J]. *Reumatol Clin*, 2012,8(Suppl 2): 39-45.
- [7] STRAUSS E J, GALOS D K. The evaluation and management of cartilage lesions affecting the patellofemoral joint [J]. *Curr Rev Musculoskelet Med*, 2013,6(2): 141-149.
- [8] TECKLENBURG K, DEJOUR D, HOSER C, et al. Bony and cartilaginous anatomy of the patellofemoral joint [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2006,14(3): 235-240.
- [9] REIDER B, MARSHALL J L, KOSLIN B, et al. The anterior aspect of the knee joint [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1981,63(3): 351-356.
- [10] SONG J G, KANG S B, OH S H, et al. Medial soft-tissue realignment versus medial patellofemoral ligament reconstruction for recurrent patellar dislocation: systematic review [J]. *Arthroscopy*, 2016,32(3): 507-516.
- [11] NOMURA E, INOUE M, OSADA N. Anatomical analysis of the medial patellofemoral ligament of the knee, especially the femoral attachment [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2005,13(7): 510-515.
- [12] DESIO S M, BURKS R T, BACHUS K N. Soft tissue restraints to lateral patellar translation in the human knee [J]. *Am J Sports Med*, 1998,26(1): 59-65.
- [13] MERICAN A M, AMIS A A. Anatomy of the lateral retinaculum of the knee [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2008,90(4): 527-534.
- [14] WALIGORA A C, JOHANSON N A, ELLIOT HIRSCH B. Clinical anatomy of the quadriceps femoris and extensor apparatus of the knee [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2009,467(12): 3297-3306.
- [15] MALONE T, DAVIES G, WALSH W M. Muscular control of the patella [J]. *Clin Sports Med*, 2002,21(3): 349-362.
- [16] GRELSAMER R P, WEINSTEIN C H. Applied biomechanics of the patella [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2001(389): 9-14.
- [17] NHA K W, PAPANNAGARI R, GILL T J, et al. In vivo patellar tracking: clinical motions and patellofemoral indices [J]. *J Orthop Res*, 2008,26(8): 1067-1074.
- [18] KATCHBURIAN M V, BULL A M J, SHIH Y F, et al. Measurement of patellar tracking: assessment and analysis of the literature [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2003(412): 241-259.
- [19] CHEUNG R T, MOK N W, CHUNG P Y, et al. Non-invasive measurement of the patellofemoral movements during knee extension-flexion: a validation study [J]. *Knee*, 2013,20(3): 213-217.
- [20] 余诗畦, 蔡宗远. 正常髌股关节在体运动学研究回顾. *医用生物力学*, 2021,36(4): 664-670.
- [21] HEHNE H J. Biomechanics of the patellofemoral joint and its clinical relevance [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1990(258): 73-85.
- [22] GRELSAMER R P, KLEIN J R. The biomechanics of the patellofemoral joint [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 1998,28(5): 286-298.
- [23] ESCAMILLA R F, ZHENG N Q, MACLEOD T D, et al. Patellofemoral joint force and stress during the wall squat and one-leg squat [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2009,41(4): 879-888.

基金项目：四川省科技厅项目（2019YFS0269）。