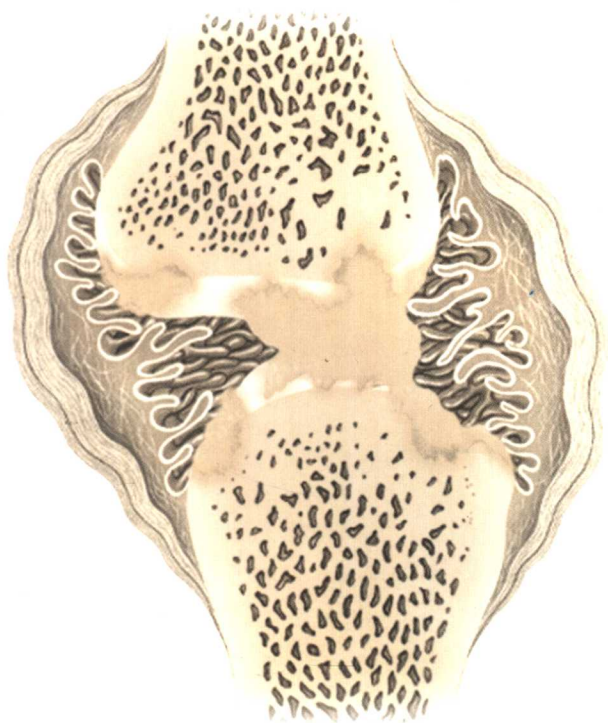


XIGUANJIE
JIBING
DE
WAIKE
ZHILIAO

膝关节疾病的外科治疗



主 编 杨国夫 李春龙 姚 楠
副主编 宋国胜 曹允信 汤喜臣 廖晓凡

黑龙江科学技术出版社
HEILONGJIANG KEXUEJISHU CHUBANSHE

膝关节疾病的外科治疗

主 编 杨国夫 李春龙 姚 楠
副主编 宋国胜 曹允信 汤喜臣 廖晓凡

黑龙江科学技术出版社
中国·哈尔滨

图书在版编目(CIP)数据

膝关节疾病的外科治疗/杨国夫,李春龙,姚楠主编。
哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,2005.7
ISBN 7-5388-4949-1

I .膝... II .①杨...②李...③姚... III .①膝关
节-关节疾病-外科-治疗学 IV .R687.4
②R473.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 083820 号

责任编辑 项力福

封面设计 洪 冰

膝关节疾病的外科治疗

XIGUANJIE JIBING DE WAIKE ZHILIAO

主 编 杨国夫 李春龙 姚楠

副主编 宋国胜 曹允信 汤喜臣 廖晓凡

出 版 黑龙江科学技术出版社

(150001 哈尔滨市南岗区建设街 41 号)

电话(0451)53642106 电传 53642143(发行部)

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

发 行 黑龙江科学技术出版社

开 本 889×1194 1/16

印 张 17.5

字 数 500 000

版 次 2005 年 7 月第 1 版·2005 年 7 月第 1 次印刷

印 数 1-1 000

书 号 ISBN 7-5388-4949-1/R·1237

定 价 30.00 元

《膝关节疾病的外科治疗》编委会

主 编 杨国夫 李春龙 姚 楠

副主编 宋国胜 曹允信 汤喜臣 廖晓凡

编 委 (以拼音为序)

崔学军(黑龙江省伊春市中医院)

曹允信(黑龙江省大兴安岭林业集团总医院 骨科)

鄂小强(哈尔滨医科大学第一临床医学院 骨科)

高 猛(黑龙江省鸡西矿业集团总医院 骨科)

李春龙(黑龙江省大庆市人民医院 骨科)

廖晓凡(黑龙江省鸡西矿业集团总医院 骨科)

梁彦辉(黑龙江省哈尔滨市第九医院 外科)

毛贵钢(黑龙江省鸡西矿业集团总医院)

齐月宾(哈尔滨医科大学第一临床医学院 骨科)

宋国胜(黑龙江省大兴安岭林业集团总医院 骨科)

单继刚(哈尔滨医科大学第一临床医学院 骨科)

汤喜臣(黑龙江省桦南县人民医院 外科)

魏晓刚(黑龙江省鸡西矿业集团总医院)

闫 峰(哈尔滨医科大学第一临床医学院 骨科)

杨国夫(哈尔滨医科大学第一临床医学院 骨科)

于恒权(黑龙江省绥化市中医院 骨科)

姚 楠(黑龙江省嘉荫县人民医院 外科)

杨占春(黑龙江省大庆市第一人民医院 骨科)

张欣为(黑龙江省绥化市中医院 骨科)

张玉斌(黑龙江省鸡西矿业集团总医院 骨科)

膝关节疾病的外科治疗

目 录

第一章 膝关节功能解剖及生物力学	(1)
第二章 膝关节的 MRI	(10)
第三章 膝关节疾病与损伤	(38)
第一节 半月板病变	(38)
第二节 急性创伤性韧带损伤	(54)
第三节 慢性韧带损伤的重建	(75)
第四节 前交叉韧带功能不全的重建	(86)
第五节 后交叉韧带重建	(100)
第六节 膝关节炎	(109)
第七节 膝关节骨折	(122)
第八节 复发性髌骨脱位	(143)
第九节 其他膝关节损伤与疾病	(151)
第四章 膝关节镜	(167)
第一节 关节镜的一般原则	(167)
第二节 膝关节镜的基本诊断及常见手术	(177)
第三节 膝关节镜下修复手术	(191)
第四节 其他疾病的关节镜手术	(208)
第五章 人工膝关节置换术	(217)
第一节 历史与现状	(217)
第二节 人工假体选择的原则	(222)
第三节 术前评估	(227)
第四节 手术方法	(229)
第五节 特殊问题处理	(239)
第六节 膝关节置换术评价	(249)
第七节 围手术期处理与康复	(252)
第八节 术后并发症的防治	(262)
第九节 人工全膝关节再置换术	(277)

第一章 膝关节功能解剖及生物力学

膝关节是下肢的主要关节,其结构和功能都是人体关节中最复杂的。

一、膝关节功能解剖

膝关节由股骨髁、胫骨平台、髌骨及其周围滑膜、关节囊、韧带、半月板和肌肉等组织共同构成。

(一) 骨结构及其表面形态

(1) 股骨:其下端向两侧和后方扩大形成内、外侧股骨髁,中间以髁间窝相隔,两髁的关节面向前逐渐变平,并于前方连合,形成一矢状位浅凹,即髁面,当小腿伸直时,可容纳髌骨。股骨内外髁关节面在矢状和冠状面上均呈凸形,股膝关节面矢状面曲线半径向后逐渐减小,在后侧它们呈圆形并互相平行。内、外侧髁前后长轴互不平行而向后分开,内侧轴较外侧倾斜更明显,与关节面横轴呈 120° 交角。内侧髁长度及曲率半径比外侧髁大,致使膝关节伸直过程中内侧髁有较大的滑动,产生股骨内旋运动。外侧髁髁面大而突起,起阻止髌骨外脱位作用。股骨两髁侧面粗糙不平,高出部分分别为股骨内上、外上髁。外上髁较小,其下有一深沟,称腓肌沟,腓肌腱由此经过。内上髁上方有收肌结节。股骨下端的次级骨化中心在出生前形成,至 019~2 岁时始与骨干愈合,该骨骺与下肢的生长有关。

(2) 胫骨:胫骨上端变厚,形成内、外侧髁,也称胫骨平台,分别与股骨内、外侧髁相接。内侧平台冠状和矢状面上均呈凹形,外侧平台矢状面上呈凸形或平坦,冠状面上呈凹形。内侧平台较大,以平台正中为起点,沿横轴将内外侧平台各分成五个等份,分别测量这些等分线上平台前后径。内外侧平台从周缘向内依次三条等分线的前后径之比分别 1: 0.92、1: 0.87 和 1: 0.82。胫骨平台的曲度大于股骨髁,两者外形不全形合,半月板可增加两者匹配程度和接触面积。相对于胫骨干轴线,内外侧平台后倾约 $3^\circ \sim 7^\circ$ 。平台中间是髁间隆起,由两个胫骨髁间结节构成,其高低常有变异,可限制膝关节的内外移动,还可使股骨在胫骨上旋转时升高,紧张韧带,从而限制其过度旋转。在胫骨髁间结节之前、后,也称髁间前、后区。在髁间前区,由前向后依次附着内侧半月板前角、前交叉韧带和外侧半月板的前角。在胫骨髁间后区,依次附着内侧半月板后角、外侧半月板后角及后交叉韧带。胫骨上端前侧有一三角形隆起,称为胫骨结节,是髌韧带附着处,可视为胫骨前缘最高点。胫骨外侧髁的后外侧面有一小的圆形腓关节面与腓骨小头相接。胫骨上端的次级骨化中心约在出生时形成,经过骨化形成两髁及胫骨结节,至 16~18 岁与骨干愈合。

(3) 髌骨:髌骨是身体中最大的籽骨,居股四头肌肌腱中,髌骨本身没有骨膜,呈三角形,前面粗糙,供股四头肌和髌韧带附着,后面分关节面和非关节面。非关节面部分位于髌骨下极,大约占髌骨总高度的 $1/4$,关节面部分有约 4~5mm 厚的软骨覆盖,十分光滑,与股骨髁髌骨滑槽相关节。关节面被中央嵴分成内外两部分,通常外侧占整个关节面的 $2/3$,内外侧关节面在纵轴方向又以横嵴分成上、中、下三区。另外,在髌骨内缘还有一个小关节面。髌骨次级骨化中心出现与闭合约在 3~6 岁间。

(二) 韧带

关节囊广阔松弛,各部厚薄不一,附于膝关节面的周缘。关节囊前壁不完整,由附着于股四头肌腱的髌骨和髌韧带填补。关节囊周围由许多韧带包括腓侧、胫侧副韧带等予以加强,稳定关节。

(1) 膝关节伸膝装置:膝关节前面为髌骨固定装置所覆盖,该装置主要由股四头肌的腱性扩张部构成。髌骨的两侧有自股内侧肌和股外侧肌腱下延的髌内、外侧支持带,分别止于胫骨上端的内外侧面,起到加强膝关节囊及维持髌骨固定作用。股四头肌肌腱、髌骨及髌韧带全体,组成了膝关节的伸膝装置。髌韧带位于

关节囊前方,起自髌骨下端及其后方的粗面,止于胫骨结节,长约6~8cm,两侧与髌内、外侧支持带相交织,上端与股四头肌的远端相延续。髌韧带深面与关节滑膜、胫骨之间隔有髌下脂肪垫和滑囊。

(2)膝关节内侧支持结构:可分三层。第一层是包裹缝匠肌的深筋膜。向前下跨越股薄肌、半腱肌肌腱,止于胫骨上端前内缘,向后扩展到窝中线,覆盖腓肠肌内侧头和窝内其他结构,前部纤维编入第二层及髌骨内侧支持带。第一层与其深面的胫侧副韧带不连接。胫侧副韧带分成浅、深两层,深层较短,构成关节囊的一部分,即内侧关节囊韧带。浅层较长,起于股骨内上髁,构成膝关节内侧支持结构的第二层,其前部纤维纵形向前下止于胫骨上端内面,紧挨鹅足止点后方,距关节面约4~6cm。后部纤维斜向后下,与其下方关节囊(第三层)及半膜肌腱部分纤维交织一道止于胫骨内侧髁后缘,同时也附着到内侧半月板后缘,形成所谓的后内侧角。充分伸膝时,该韧带绷紧有助于膝关节的稳定。屈膝过程中,浅层韧带的前部向后推移,盖过侧副韧带深层。胫侧副韧带前部浅、深层之间,相对于膝关节线附近,有一滑囊相隔。胫侧副韧带浅层下部被鹅头肌(缝匠肌、股薄肌和半腱肌)所覆盖。这些肌腱与副韧带之间也有滑囊,所有滑囊可出现炎症改变。膝关节内侧支持结构的第三层为关节囊,前方薄弱,向下覆盖脂肪垫,向上笼罩髌上囊。向后在浅层侧副韧带之下增厚,形成内侧关节囊韧带。该韧带起自股骨内上髁,向下与内侧半月板附着,又称为半月板股骨韧带。再向下行,止于胫骨上端内面,也称半月板胫骨韧带,此韧带很短,在膝关节屈伸时,它可允许半月板在该纤维长度的范围内前后活动。如该段韧带断裂,不仅丧失对半月板的控制,而且可造成关节的旋转不稳。

(3)膝关节外侧支持结构:也可类似分为三层。第一层为筋膜层,在膝部和大腿的外侧面,该筋膜增厚形成髂胫束,部分纤维向后编入股二头肌筋膜,并在腓窝中线与覆盖膝关节内侧的筋膜相联合。向前止于髌骨、髌韧带和胫骨外髁。髂胫束向下经过膝关节的外侧方,止于胫骨外侧髁前外侧面的髂胫束结节(Gerdy结节)。该筋膜还通过外侧肌间隔附着于股骨粗线,维持髂胫束一定的张力。

第二层由腓侧副韧带、小豆腓骨韧带(fabellofibular lig.)和弓状韧带组成。腓侧副韧带从股骨外上髁向后下走行,达腓骨尖端,呈圆索状结构,与外侧半月板不连接。它在膝关节完全伸直时是绷紧的,一旦屈膝便松弛。股二头肌借助于它在韧带周围的环行腱纤维,使外侧副韧带保持持续的张力。屈膝时股二头肌可把该韧带向后拉紧,从而起到稳定关节的作用。小豆腓骨韧带位于侧副韧带和弓状韧带之间,起自腓肠肌外侧头,止于腓骨茎突。第三层是真正的关节囊,较为薄弱,在前面,其纤维下覆盖着脂肪垫,向后走行与内侧纤维相混合。在后侧髁间区该囊增厚,形成髌斜韧带。

(4)髌斜韧带和弓状韧带:髌斜韧带为半膜肌的反折部,自胫骨后上方斜向上外,止于股骨外上髁后方,与关节囊后部相融合,可加强后关节囊并制止膝过分伸直。髌斜韧带构成腓窝底部一部分,其表面有腓动脉经过。关节囊的后外侧部纤维增厚,形成髌弓状韧带,越过由关节囊内穿出的腓肌腱,向上附着于股骨外上髁的后面,向下附着于腓骨小头和胫骨外侧髁的边缘。

(5)前交叉韧带:上端附着在股骨外髁内侧面的一半部分,呈新月形,凸面朝后,下端附着在胫骨髁间前区和内侧髁间结节之间,并与内外侧半月板前角相连接。宽约11mm,长约38mm。其纤维可分为前内侧和后外侧两部分。屈膝时前交叉韧带前内侧部紧张,而后外侧部分因其股骨、胫骨起止点间距离缩短反而变得松弛,伸膝时相反。屈曲约45°时,前交叉韧带松弛程度最大。膝关节的旋转程度对韧带的张力也有影响,屈膝过程中的胫骨内旋,可使该韧带纤维拉紧。当胫骨外旋时,则趋向于松弛。前交叉韧带功能包括:①限制胫骨过度前移。②限制膝关节过伸。③限制胫骨的旋转。④限制伸膝位的侧向活动。

(6)后交叉韧带:上端附着在股骨内髁外侧面,也呈新月形,凸面向下。下端附着在髁间隆起的槽沟内,并向下延伸到胫骨髁间窝的后缘中部。部分纤维与外侧半月板后角相连。宽约13mm,长约38mm。屈膝时,该韧带后部纤维因起止点靠近而松弛,而韧带其余部分保持着紧张状态。屈曲约30°时,大部分纤维均趋紧张。它是膝关节内最强的韧带,是膝关节稳定的重要因素。后交叉韧带可防止胫骨后移。当胫骨内旋时,前、后交叉韧带互相缠绕,韧带趋于紧张。而当胫骨外旋,它们变得松弛,到一定程度时相互间不再缠绕。后交叉韧带功能包括:①限制胫骨过度后移。②限制膝过伸。③限制伸膝位的侧方活动。④限制膝关节

旋转活动。

(三) 肌肉

运动膝关节的肌肉主要分为两类,即伸膝肌和屈膝肌。前者指的是股四头肌,其四部分肌肉不同程度地负责膝关节伸直。屈膝肌包括股二头肌、半腱肌、半膜肌、缝匠肌、腓肠肌、股薄肌和腓肠肌,其中股二头肌还有外旋作用,半膜肌、半腱肌、缝匠肌、股薄肌和腓肠肌还有内旋作用。

1. 伸膝肌

(1) 股直肌:位于股前中部,起于髌前下棘,在下端变窄形成一个宽的筋膜,横径约5~8cm,附着于髌骨上缘,大部分纤维越过髌骨前面,继续向下延伸为髌韧带。

(2) 股外侧肌:股外侧肌为股四头肌中最强大者,起于股骨粗线外侧唇,位于股直肌外侧。距髌骨上缘2~3cm处成为腱性,下部纤维在冠状面上呈约 $12^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 角附着在髌骨上。小部分纤维继续进入外侧支持带。另有部分纤维向外侧走行加入髌胫束,加强伸膝时胫骨的外旋作用。

(3) 股内侧肌:起于股骨粗线内侧唇,在功能上分为股内长肌和股内斜肌,股内长肌较大,位于近侧,纤维方向近乎垂直,与股骨纵轴呈 $15^{\circ} \sim 18^{\circ}$ 角,股内斜肌位于肌肉远侧1/4,与股骨纵轴呈 $50^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 。这两部分肌肉由不同的神经支配,它们在距髌骨几毫米时才变成腱膜,并直接进入髌骨的内外上缘。部分纤维参与构成内侧支持带。

(4) 股中间肌:股中间肌是股四头肌四部分中最小的一个,起于股骨体的前面,肌纤维向下止于股直肌深面和髌骨上缘。其下部深面有少许肌束形成膝关节肌,止于膝关节囊,起到伸膝和向上牵拉膝关节囊的作用。

股四头肌的主要功能是伸膝,股内斜肌还有防止髌骨向外半脱位的作用。有人认为股内侧肌在膝关节伸直最后 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 时起主要作用,此肌肉的早期萎缩可导致膝最后伸直功能受限。也有学者持不同意见,Brewerton(1955)和Lieb(1968)用局部浸润麻醉阻滞支配股内侧肌的神经来降低该肌肉功能,结果并不妨碍膝关节的最后伸直。但同时他们也证明最后 15° 的伸膝,需要股四头肌更大的动力,超过整个伸直过程力量的60%,因此在整个肌力降低时,该肢体的这部分活动范围最容易丧失。

2. 屈膝肌

(1) 股二头肌:长头起自坐骨结节,短头起自股骨粗线,在长头深面与之相合。在膝关节平面共同形成圆而粗的肌腱,向下止于腓骨小头,并分出纤维到髌胫束、外侧副韧带及后关节囊,因而在膝关节屈曲时,能牵拉这些韧带使之保持紧张,维持膝关节外侧的稳定。

(2) 半腱肌:位于股后内侧,起自坐骨结节,在股骨中点水平即成为腱性,越过内侧副韧带,同缝匠肌、股薄肌一道互相重叠交织,形成鹅掌腱,止于胫骨上端内侧。与内侧副韧带之间形成一个大的鹅足囊。

(3) 半膜肌:半膜肌腱增强关节囊的后内角,部分纤维反折成为腓斜韧带。除可屈膝及内旋胫骨外,对膝关节后方的稳定也起着重要的作用。

(4) 缝匠肌:是全身最长的肌肉,呈扁带状,起于髌前上棘,经大腿前面,转向内侧,形成宽阔的腱膜,向前越过股薄肌、半腱肌肌腱,止于胫骨上端的内侧面。一部分纤维移行于小腿筋膜。收缩时可屈膝屈髋,并起稳定膝关节内侧作用。

(5) 股薄肌:是大腿内侧最浅层肌,起自闭孔周围的耻骨支、坐骨支和坐骨结节等骨面,下端细薄,位于缝匠肌和半膜肌之间,止于胫骨内侧髁,可加强膝内侧韧带稳定性。

(6) 腓肠肌:起自股骨外侧髁的外侧部分,向后下越关节时居关节纤维囊与滑膜之间,在外侧半月板外缘沟中下降,穿弓状韧带之下,止于胫骨的比目鱼肌线以上的骨面。腓肠肌构成腓窝底之一部分,收缩时可使膝关节后屈和内旋。

(7) 腓肠肌:腓肠肌内、外侧二头起自股骨内、外侧髁的后面,而头相合,约在小腿中点移行于肌腱,并与其深面的比目鱼肌相合,止于跟骨结节。两头起点下方与股骨髁间有滑囊相隔,内侧滑囊较大,且常与关节囊相通,易因损伤或渗液较多而形成突向腓窝的囊肿(Baker囊肿)。

(四)半月板

在股骨与胫骨关节面之间,垫有两块纤维软骨板,分别称为内、外侧半月板。半月板周缘厚、内缘薄、下面平坦与胫骨平台相接,上面凹陷,与股骨髁相接,切面为三角形。内侧半月板较大,呈“C”形,前窄后宽,前后端分别附着于胫骨髁间前、后区,其边缘与关节囊及胫侧副韧带紧贴,部分半膜肌纤维通过关节囊止于内侧半月板的后内侧缘。外侧半月板较小,呈环形,前后端也分别附着于胫骨髁间前、后区,其后外侧有一沟,肌腱将外侧半月板与腓侧副韧带隔开,故外侧半月板较内侧半月板有更大的灵活性。从它的后端,发出一坚强的斜行纤维束附着于股骨内侧髁,与后交叉韧带相贴,根据其与后交叉韧带的位置关系,分别称之为半月板股骨前、后韧带,其中以后者多见。两半月板均覆盖了内、外侧平台外缘近 $2/3$ 面积。在两板的前部连有膝横韧带。半月板的功能包括:①传导载荷。膝关节属轻度不吻合的关节面对合,半月板在此起重要作用。不吻合曲面易形成压力过高而不利载荷传导。而半月板、关节软骨及其下骨质的可塑性,在载荷增加时能发生变形,使接触面积增大,从而整个关节面压力分别均匀,有利于载荷传导。有作者研究发现,膝伸直时,压应力的 50% 经半月板传导,屈膝 90° 时则 85% 压力负荷由半月板传导。半月板切除后的膝关节接触面积约降低 50% 而导致压应力增高。有人测定膝关节生理负重面为 23cm^2 , 大于股骨髁与胫骨髁的接触面。②维持稳定。加深了胫骨髁关节面,对膝关节有稳定作用。韧带和半月板构成“8”字型结构,半月板在膝关节伸屈活动时可以向、后移动,从而使股骨髁在任何伸屈位置上都有楔形填充以得到稳定。半月板切除后的膝关节易产生前后十字韧带松弛而造成膝关节不稳定。③协助润滑作用。半月板的活动可使滑液均匀分布,有益于润滑关节。切除半月板后,膝关节的摩擦系数增加 20%。另外,半月板楔形充填,扩大了股骨髁与胫骨髁的间接接触面积,可以防止关节囊或滑膜的嵌入。④减轻震荡作用。半月板能在正常步态中减轻载荷震荡。切除半月板后的膝关节吸收负荷震荡的能力要减少 20% 而易产生骨关节炎。

(五)关节囊和滑膜

膝关节的纤维囊由薄而坚强的纤维膜构成,上起自股骨髁间线,两侧仅高于关节边缘 1.25cm,所以股骨内外上髁均在关节囊外,下止于胫骨关节面的远侧边缘 0.3~0.6cm。关节囊薄而松弛,周围有韧带加强。前面连接股四头肌肌腱及髌韧带,外侧有弓状韧带加强,内侧纤维囊与内侧副韧带后部纤维相交织,并和内侧半月板边缘相连,成为内侧副韧带的一部分。膈斜韧带和弓状韧带起到加固后方关节囊的作用。关节囊本身对关节的稳定并无多大作用,伸膝时,膝关节之所以稳定,系由其周围韧带、肌肉来维持。

膝关节滑膜是全身最大的滑膜,内衬在关节囊内面。起自关节软骨边缘,然后反折于关节囊内。向上延伸至股中间肌下形成大的囊袋,多与髌上囊相通。两侧覆盖在股骨髁表面,形成外侧和内侧沟部。向下延伸与半月板附着,并覆盖胫骨平台缘约 0.7cm。前、后交叉韧带也被滑膜所包绕。另外,外侧半月板背侧肌腱通过的管道也有滑膜覆盖。部分滑膜隆起形成皱襞,按其位置分为:①髌上皱襞。位于髌上囊与股胫关节之间,通常中央有孔,从而又分为髌上内侧和外侧皱襞。②髌内皱襞。起于内侧髌上皱襞,沿关节内侧壁持续向下走行,远侧至覆盖脂肪垫的滑膜上。③髌下皱襞。髌下滑膜包绕脂肪垫并连于髁间窝,又称滑膜韧带。这些皱襞为胚胎的膜性残留,约在 20%~40% 正常人中出现。

(六)膝关节内脂肪垫

充填在髌骨、股骨髁下方、胫骨髁上方和髌韧带之间,并向两侧延伸,约超出髌骨内外缘 1cm 左右。它将关节囊的纤维层与滑膜分开,具有衬垫和润滑的作用。股四头肌收缩时,脂肪垫内压升高,成为坚硬的实体,以限制膝关节的过度活动。屈膝时,脂肪垫能充填到空虚膝前关节腔。除髌下脂肪垫外,大多数膝关节,尚可有以下脂肪垫:前髌上脂肪垫、后髌上脂肪垫及膈脂肪垫。

(七)滑液囊

膝关节周围有许多肌腱,活动范围又大,因此滑液囊也相对较多。

(1) 膝关节前面的滑液囊:位于髌骨和髌韧带周围,有 4 个,它们是髌上囊、髌前皮下囊、髌下皮下囊和髌韧带下囊。其中髌上囊最大,通常与股胫关节相通。髌前皮下囊位于膝关节前面,容易受到损伤而出现症状。

(2) 膝关节外侧滑液囊: 膝关节外侧, 股二头肌、外侧副韧带、腓肠肌、腓肠肌外侧头均越过关节线及股骨外侧髁, 此处滑液囊主要有: ①位于外侧副韧带和股二头肌附着点之间的股二头肌囊。②位于外侧副韧带与腓肠肌之间的滑液囊。③位于股二头肌深面与腓骨头之间的滑液囊。④位于腓肠肌外侧头起始部深面的腓肠肌外侧囊。⑤腓肠滑液囊, 与膝关节腔后外侧通。

(3) 膝关节内侧滑液囊: 膝关节内侧滑液囊一般有 6 个: ①鹅足囊, 位于鹅头肌附着点下面和内侧副韧带下部浅层之间; ②半膜肌固有囊, 位于半膜肌肌腱与胫骨髁间; ③半膜肌囊, 位于腓肠肌内侧头浅部与半膜肌腱之间, 可与关节腔相通; ④腓肠肌内侧囊, 位于腓肠肌内侧头起始部深面与关节囊之间; ⑤内侧副韧带与半膜肌腱之间的滑液囊; ⑥半膜肌腱与半腱肌腱之间的滑液囊。在内侧副韧带浅、深层之间有一小滑囊, 有时炎症易误诊为半月板撕裂。

(八) 血管神经

膝关节的血运十分丰富, 由股动脉、腘动脉、胫前动脉和股深动脉发出的分支构成动脉网。膝关节近远侧动脉网和动脉分支所构成的吻合支不但是关节结构的营养来源, 在腘动脉主干发生血供障碍时, 也是侧副循环的主要途径。旋股外侧动脉降支、膝最上动脉均发自股动脉, 分别行于膝外、内侧, 向下参加膝血管网。膝上内、外侧动脉由腘动脉发出, 绕股骨髁与其他动脉吻合。膝中动脉从腘动脉发出, 供应腓肠肌和关节囊, 不参加膝血管网。膝下内、外侧动脉均发自腘动脉, 环绕于膝前, 与其他动脉吻合。胫前动脉返支为胫前动脉发出, 并与膝下动脉吻合。股深动脉第三穿支也发出分支参与膝关节血管网的血供。膝关节前部由股神经的肌皮支、闭孔神经前支及隐神经支配

二、膝关节的生物力学

(一) 膝关节的运动

1. 膝关节的屈伸活动

解剖学上膝关节被列属屈戌关节。但生物力学研究表明, 在正常步态周期中, 膝关节的运动绝不是一个单纯的铰链运动, 而是由一系列复杂的多轴心三维运动组成。膝关节屈伸运动的横轴贯穿股骨内、外髁, 在膝关节线之上偏后, 但具体位置并不恒定, 横轴本身可有一定的移动距离。膝关节屈伸时, 在股骨髁上许多曲率半径的中心点, 实际上是不同屈曲角度下的横轴位置。曲率中心移动的轨迹, 是横轴移动的距离和方向, 在不同的屈伸角度描出的瞬时旋转中心可连成一个“J”型曲线。

膝关节在矢状面上作屈伸运动的同时, 股骨髁和胫骨平台之间还伴有滑动和滚动。股骨髁在矢状面上的弧线长度是胫骨平台的两倍, 屈膝中股骨髁在胫骨平台上始以滚动为主, 后转为以滑动为主。一般认为, 膝关节从伸直位到屈膝 20° 的运动方式主要是滚动, 而从屈膝 20° 到完全屈曲则主要是滑动, 当然在滑动中还可兼有少量的滚动。

2. 膝关节的旋转活动

正常膝关节屈曲时胫骨自动内旋 20° , 伸膝时外旋 20° 。这种旋转运动伴随于膝关节的屈伸过程, 为不随意运动, 是骨外形结构和关节韧带附着的结果。伸膝时, 胫骨绕自身纵轴向外旋转, 距完全伸直还差 30° 时, 前交叉完全拉紧, 牵拉胫骨向外旋转, 在距伸膝差最后 10° 时, 胫骨外旋最快, 此后旋转度下降。膝关节完全伸直时, 前、后交叉韧带互相缠绕、拉紧, 侧副韧带也绷紧, 这时膝关节获得牢固稳定, 不再发生旋转及侧方活动, 股骨髁和胫骨平台之间也达到最大的负重面积。这一过程有如旋紧螺丝钉之最后动作, 故又称之为扣锁现象。与此相反, 屈膝时则表现为一松锁过程。膝关节旋转活动的纵轴位于胫骨髁间隆起的内侧, 随屈伸活动有轻微的移动, 如伸膝时, 纵轴前移。

上述旋转运动中, 股骨内外髁分别移动了 $5 \sim 6\text{mm}$ 和 $10 \sim 12\text{mm}$ 。造成内外髁移动距离差别和产生旋转的机理包括: ①股骨内外髁弧线长度不等, 内侧股骨髁较大, 弧度较长。在距完全伸膝差最后 20° 时, 股骨与胫骨髁的相对运动由滑动变为滚动, 但股骨内外髁各自的滚动幅度不一, 外髁在最后 20° 时开始, 而内髁则在最后 10° 开始, 因此发生胫骨外旋。②胫骨平台内外侧形状不同。③韧带的制约作用。在膝关节屈曲的

全过程,前后交叉韧带和内侧副韧带始终有一部分纤维保持紧张,旋转活动的纵轴在伸膝位时又偏向内侧,而外侧副韧带在屈曲位时松弛,形成了以内侧为中心的三点支持。另外,内外侧副韧带方向不同,外侧副韧带斜度大,在股骨髁移动较晚时才会出现韧带紧张。这些功能上的特点,适应于股骨髁在伸直运动过程中发生内旋。④力的不平衡。内旋屈肌力大于外旋屈肌力,前交叉韧带位于旋转轴外侧,其紧张可造成股骨髁外旋。

3. 侧方活动

除屈伸、旋转运动外,膝关节还有轻度的侧方活动。随着膝关节屈曲,其外展、内收活动也有所增加。伸膝位,关节内外翻活动范围约 2° ,屈膝时则可增至 8° 左右。整个膝关节的前后活动幅度较小,屈膝 45° 时大约只有3mm,屈膝 90° 位时有所减少。

可见,膝关节不但有矢状面上的屈伸活动,还有冠状面上的内收外展,横截面上的内外旋活动。这些运动受半月板、韧带的控制和导引,解剖上前交叉韧带纤维与内、外侧半月板前角相连,在后方外侧半月板后角分出半月板股骨韧带与后交叉韧带并行附于股骨内髁,因此半月板与交叉韧带在膝关节内形成一“8”字形的连续整体结构。这种“8”字形连续,对膝关节屈伸过程中发生的旋转活动有限制和引导的作用。

4. 髌骨的活动

髌骨运动和其与胫骨结节的对应位置、Q角、股四头肌肌力、下肢力线以及膝关节的骨性解剖等因素有关。髌骨运动方式与胫股关节矢状面的弧线运动和轴向旋转紧密相连,最终达到髌股关节压力与接触面垂直。在整个屈曲过程中,髌骨滑动的范围约7~8cm。

5. 步态分析

行走时,当一侧足跟着地至该足跟再次着地时称为一个步态周期。对某一特定的下肢来说,在一个步态周期中,要经历踩地负重和离地摆动两个步相,即负重相和摆动相,站立相约占整个步态周期的60%~65%。在足跟着地前,膝处于伸展位以增加步长,足跟着地后,膝短暂轻度屈曲,平均 17° ,约占步态周期的15%。随着上身及对侧肢体向前摆动,膝复伸展,并于步态周期40%时达峰值,此时同侧足仍未离地。随后膝开始屈曲以缩短肢体配合摆动。膝屈曲先于髋屈曲,其第二峰值出现在摆动相早期,约为周期的75%时,最大屈曲度约 73° ,此后迅速伸展,于对侧足跟触地前达到最大伸展位。其间有双足承重相,其长短与行走速度密切相关,速度越快,此相越短。在平地常速行走时,膝关节始终没有完全伸直,这有利于震荡的吸收。只有在站立时,主要是一足负重时才完全伸直,呈现“扣锁”现象。

行走时膝关节运动范围和步速、步距有关。按一般人正常步速行走(约95步/min)计算,每一个步态周期中膝关节的运动范围在 70° 左右,伴约 20° 的内收外展和 10° ~ 15° 的内外旋,整个机体的活动状态也影响这些角度值。

单腿负重期身体重心线定会移向负重足,两足间距窄则重心移动小,越省能量。膝周围肌肉周期性收缩多数在负重和摆动相的开始和结束时,说明肌肉的主要作用是加速或减速肢体运动。膝部畸形或强直病例,即使施行了人工膝关节置换术,由于术后其关节周围肌群不能正常周期性收缩,使膝丧失动力稳定机理,病人主观感觉关节不稳,这就需要步态训练和肌力康复。

6. 各种日常活动所需的关节活动范围

根据 Kettelkamp(1973)报道,在日常活动中膝关节所需的屈伸范围是,步行约需 67° ,上台阶需 83° ,下台阶需 90° ,从椅中站起则需约 93° 。上下台阶时膝关节所需活动范围还与身高和台阶高度有关。

(二) 膝关节稳定的维持

膝关节面表浅,匹配度小,其稳定机理十分复杂。膝关节稳定结构包括由韧带、半月板、关节面形态、关节囊产生的被动稳定和由重力地面反应力和肌力产生的主动稳定两种机理。增加关节负荷,关节稳定性增加,这被称作加压稳定机理。

韧带和周围软组织是膝关节稳定的最主要因素。内侧稳定性由关节囊、内侧副韧带、内侧半月板和交叉韧带构成的被动稳定结构以及半膜肌腱、股内侧肌扩展部和鹅足构成的主动稳定结构来维持;外侧稳定性则

由关节囊、外侧副韧带及交叉韧带构成的被动稳定结构和由股二头肌腱、腓肌腱、髂胫束、股外侧肌扩张部构成的主动稳定结构来维持。Burstein 认为,内外翻稳定机理发挥作用的先后顺序是:①负荷向内或向外髁移动。②肌肉紧张。③侧副韧带受牵拉产生限制力矩。以胫骨受到内翻应力为例,最初膝关节是通过增加股胫关节内侧室的压力(减少股胫关节外侧室压力)来对抗膝关节的内翻力矩。当内翻力矩超过一定限度时,除关节负荷完全集中在内侧股胫关节面外,还会出现股四头肌和腓绳肌主动收缩现象,来增加内侧关节面负荷,防止关节内翻。内翻应力的继续增加,最后引起膝外侧副韧带、交叉韧带的紧张,进一步限制内翻。

对抗胫骨前移的被动稳定结构为股四头肌、前交叉韧带、内侧副韧带和后关节囊,主动稳定结构为半膜肌腱和腓肌腱。膝关节后方稳定性主要由后交叉韧带和关节囊维持。旋转稳定性由上述结构共同维持,膝于伸直位时最稳定,其机理是侧副韧带和交叉韧带均紧张,使骨端压紧,同时股胫骨关节面和半月板间形合最好。

膝关节主动运动是在被动稳定机理允许的范围内进行的。膝关节的松弛性给关节运动以额外的自由度,可以将力传递给韧带和肌肉,这对减少关节面受力有重要意义。松弛与稳定是矛盾的两个方面,但两者都是膝关节正常功能所必需的。

(三) 膝关节受力

膝结构和功能的复杂性决定了其受力的复杂性,膝受力来自所支持的体重、膝关节的肌力和加速身体运动所需的力。这些力作用于关节面、韧带和关节囊,后者产生拉张力,对关节面形成压力。

膝受力主要指股骨两髁与胫骨平台之间的压应力,它随重心变化和小腿活动状态而变化。两腿同时站立时膝无弯曲力矩,无肌力产生,分别承受膝以上体重的一半,约为 43% 体重。单腿站立时,身体重力位于膝内侧,为维持膝关节以上部分的平衡,负重腿向外侧倾斜,使重力线通过负重足,并由外侧肌群提供拉力上。可见此时膝关节受力包括负重膝以上的体重和平衡肌力。非负重侧扶拐既可分担体重,又能减少膝关节内翻力矩,因而可明显减少负重膝承载压力。

平地行走时,作用在膝关节的力主要有三个,地面反作用力(它是体重和质量惯性力的合力)、髌韧带拉力和股胫关节压力。根据力的合成定理,重力、惯性力和肌肉的合力构成了平地行走时膝关节的承载负荷,它通过膝关节中心,可达到体重的 2~3 倍,在平地快速行走时,可增加到体重的 4.3 倍,上下楼时则分别为 4.4 和 4.9 倍。

压力是平地行走时膝关节承受的主要应力,但张应力和剪切力同时存在,后两种应力在上下楼等其他日常活动中明显增加。

(四) 股胫关节的接触面积

不同作者用各自方法所得的股胫关节接触面积实际数值差异很大。但共同结论是:膝关节内侧室较外侧室接触面积大;高负荷下半月板承担股胫关节总压力的一半,而低负荷下(小于体重或一半体重)股胫关节压力分布较不确定,可很少甚至没有股胫骨间的载荷直接接触传递。有人认为,在正常对线或膝内翻畸形时,内侧髁均较外侧髁负重重大。即使在膝外翻畸形,仍有约 70% 病例表现为内侧髁负重重大。股胫骨直接接触面积随屈膝而明显减小。内侧髁负重重大,其接触面积也大,所以内外髁单位面积承受的压力可能大致相等。

半月板增加关节面接触面积,起分担载荷的作用。通过形变,提高对应关节面的顺应性,它能承受较高的应力,避免了关节软骨和软骨下骨的应力集中。不负重时,大约半月板的一半和裸露软骨的 10% 是接触区。在两倍体重的负荷下,大约 2/3 的半月板和 2/5 的裸露软骨有接触。内外侧半月板负重情况不同,屈膝 30°,两倍体重负荷的条件下,内侧半月板担负内侧压力的 50%,外侧半月板担负外侧压力的 80%。切除半月板后股胫骨接触面积可减少 1/3 至 1/2。

(五) 股骨、胫骨关节面下松质骨的强度

膝关节周围松质骨强度随部位和深度的不同而有所改变。一般来说,紧靠关节面的松质骨强度最大,越远离关节面其强度越小。不同个体间的松质骨强度差异也很大,但它们的共同点是:①胫骨内侧平台的松质

骨强度大于外侧平台,约为1.7倍。内侧平台以中、后区域强度最大,外侧平台松质骨高强度区域相对集中,局限在平台后方,这种分布也并非绝对。②关节面下5~10mm处松质骨强度衰减程度最大,距关节面相同距离处的股骨侧松质骨强度为胫骨侧的2倍。随着远离关节面,胫骨内外侧松质骨的高强度区逐渐移向两边。③髁间隆起处松质骨强度明显较内外侧平台小。与此类似,股骨髁间窝区松质骨强度也小于股骨内外髁。④屈膝45°时股骨髁接触区的骨质强度大于伸直或屈膝90°时的接触区。

病理状态下松质骨强度所发生的改变,与膝关节对线密切相关。内外翻畸形时,过高负重一侧的骨质强度可比正常高出3倍,而疏松一侧可较正常弱10倍。类风湿关节炎和骨性关节炎时,胫骨平台下的松质骨强度通常较正常弱(即使在内、外翻畸形,内髁或外髁承受异常高应力情况下),其中类风湿关节炎较骨性关节炎降低更明显。

松质骨强度研究对假体固定有着重要意义。正确调整下肢对线、保证负重均衡分布、尽量保留近关节面骨质、假体完全覆盖松质骨断面等措施,可提高人工关节的固定效果。

(六) 髁股关节力学特点

髁骨的机械功能之一是改变股四头肌方向,使伸膝装置能在股骨髁滑槽内沿着一定的轨迹稳定地运动。髁骨另一功能是增加股四头肌作用力矩,加强其机械效益,并减少股四头肌腱在股骨髁的摩擦。切除髁骨后完成同样运动,股四头肌需增加30%的收缩力。

髁股接触面积、接触部位随膝屈伸程度和受力状态而变化。伸膝位,髁骨位于股骨髁关节面上方,髁股压力为0。屈膝30°,髁骨下区与股骨接触,屈膝60°时接触部位变为髁骨中区,至屈膝90°时接触面移至髁骨上区。屈膝120°时髁股关节接触面积达到最大值,约占整个髁骨关节面的32%(5cm²)。如继续屈曲膝关节,则髁骨内外侧关节面与股骨内外髁,股四头肌腱与股骨关节面开始接触。髁骨内缘的小关节面,仅在屈曲达到140°时,才与股骨髁相接触。

髁骨受力包括股四头肌力、髁韧带拉力和髁股关节压力,它们形成一平衡系统。髁股关节压力随膝屈伸程度和受力状态而变化。压力值可用力的三角形法则求得。当关节屈曲发生在步态周期摆动相时,髁股关节压力只为体重的一半。而在站立位屈膝30°时,髁股关节压力和体重相等,屈膝60°时,髁股间压力升至体重的4倍,屈膝90°时为体重的6倍。继续屈膝,股四头肌腱与股骨髁髁骨滑槽发生接触而分担部分应力,髁股关节压力得以减少。上下台阶时膝关节受力情况与步行时不同。上台阶时膝屈曲位负重,髁股关节受力可高达3.3倍体重。下台阶时身体重力使股骨有向前移动的倾向,这要靠髁股关节的反应力和后交叉韧带的张力来对抗。有的病人主诉下台阶困难,简单的解决办法是侧身或反身下台阶,这样能减小髁股关节作用力。增加负重不会改变髁股关节接触部位,只是接触面积会有所增加。股四头肌力线与髁韧带夹角称“Q”角,“Q”角的改变会使髁骨关节面受力分布不均,产生局部高压状态。

(七) 功能解剖和生物力学原则在人工膝关节置换术中的应用

要恢复关节复杂的运动,对人工膝关节假体关节面几何形状就有很高的要求。正常膝关节在负荷下提供:屈伸、轴向旋转、前后移动、内收外展和对抗内外向剪力。膝关节属多半径关节,关节面自身限制小,承受应力较小。早期人工膝关节假体采用铰链式、单半径形关节面,远不能满足上述要求,这些假体松动失败的教训成为随后设计的经验借鉴。

关节面形状与关节稳定机理和假体骨界面受力有关。关节面形状的限制可以增加假体松动的危险(如几何型膝假体,其关节面限制很大),单纯重视了关节面形状的稳定作用,忽视了一定程度的旋转、侧方运动也是正常膝运动的有机组成部分,因此其临床假体松动率很高。现仍在使用的膝假体中多数模仿了股骨髁的多半径形状,差别主要是胫骨平台不同的限制程度和是否保留交叉韧带。旋转限制也是评定关节面限制程度的重要指标。

↑假体稳定→↑假体限制→↓运动→↑界面应力→↑松动危险性

↓假体稳定→↓假体限制→↑运动→↓界面应力→↓松动危险性

除了关节面形状,关节周围软组织在关节稳定中起重要作用。减小假体关节面限制就要充分利用韧带

等的稳定机理,发挥其负荷分担作用。

交叉韧带有其作用,保留后交叉韧带可使股骨髁后移,这增加了屈曲范围和股四头肌力矩。限制程度小、保留交叉韧带的假体较半限制、切除交叉韧带的假体在上下台阶时步态更接近正常。保留交叉韧带时要注意考虑韧带和假体的配合,避免因两者不配合而产生应力失衡。几何型假体保留交叉韧带,却采用单半径关节面,由于后交叉韧带的张力而限制了屈膝范围,同时易产生假体松动。运动型假体也保留后交叉韧带,但采用了多半径关节面,胫骨平台较为平坦,关节面限制小,允许前后向移动,使膝关节不仅可完全屈曲,韧带应力也接近正常。

减少对膝关节的运动限制,要求假体关节面形合度要小,这会产生点或线性接触,引起应力集中,加速假体磨损。如要平均应力分布,势必要增加关节面形合度,这又会影响韧带正常的力学功能,并可能产生额外的界面应力。对此,带有半月板的膝假体,即平均股胫骨关节面间的应力分布又可满足运动需要,起到很好的协调作用。这种带有半月板功能的膝假体,更好地模拟了人类膝关节运动,可认为是继绞链型、髁型膝假体之后的第三代膝假体。

正常下肢力线从股骨头中心到踝关节中心,此线经过膝关节中心或稍偏内侧,与身体重心线成 3° 外翻。股骨解剖轴线与下肢力线呈 6° 外翻,换言之与身体重心线成 9° 外翻。胫骨平台与距骨的两者中心的连线构成小腿力线,与身体重心线也有 3° 的外翻角。不同个体这些角度略有变化。人工关节置换术的长期疗效有赖于下肢正常力线的恢复。假体安置最理想的角度是使术后双下肢站立时,膝关节横轴平行于踝关节和地面,恢复关节面的正常力学分布。

(黑龙江省大庆市人民医院 骨科 李春龙)

第二章 膝关节的 MRI

MRI 是继 CT 和其他成像方法之后,又一个临床诊断领域中的重大突破,促进了医学影像诊断学的发展。从磁共振现象的发现至今,发展极为迅速,由于其特殊的成像方法,各种新的成像技术的不断涌现,使其在临床诊断中的作用越来越突出,MRI 对人体无放射性危害,并对人体无任何生物副作用,能对人体任意部面进行直接成像,无骨密质对图像所造成的伪影,所以 MRI 对人体的骨与软组织系统的诊断提供了一种可靠和安全的新方法。

磁共振图像信号的强弱,一方面与组织类型有关,另一方面也与所采用的成像序列有着密切关系。所以,要更好地理解一幅磁共振图像,就必须掌握一些磁共振基本知识。

第一节 磁共振的形成

磁共振现象是指具有磁性的原子核处在外界静磁场中,并用一个适当频率的射频电磁波来激励这些原子核,从而使原子核产生共振,向外界发出电磁信号的过程。磁共振现象产生有三个基本条件:具有磁性的原子核,外界静磁场和适当频率的电磁波。

一、磁性原子核

原子核是由质子和中子组成的,质子带正电而中子不带电,且原子核一直处于自旋之中。自然界中有许多原子核,但并不是所有的原子核都具有磁性(能产生磁共振),只有那些质子数或中子数为奇数,或两者均为奇数时,这样的原子核就会带“净电荷”。根据电磁学原理,运动的带电体周围会产生磁场,所以这样的原子核就具有一定的磁场,称为磁矩(magnetic torque),用 μ 来表示。具有磁性的原子核有:氢(^1H)、碳的同位素(^{13}C)、氟(^{19}F)、磷(^{31}P)、钠(^{23}Na)等。而氧(^{16}O)、碳(^{12}C)等原子核无磁性。

在人体中,各种组织含有丰富的氢原子(约占人体重量的 $2/3$ 以上)。同时氢原子核在自然界中也是一个最简单的核,只有一个质子,所以通常氢原子核也称为质子。该质子绕其中心轴自转的同时,也在绕某一轴作进动(precession),这种运动方式与儿童玩的陀螺相似。对氢原子核进行 MRI 比其他种类的原子核成像方便,一般我们所说的 MRI 都是指对氢原子核的 MRI。当然,也可以对其他原子核(如磷)进行 MRI。由于在人体中其他原子核含量小,所以要得到清晰的图像就比较困难。

二、主磁场

为了形象地解释氢原子核在外界磁场作用下的行为,可以用一个指南针来描述氢原子核。指南针通过自己的磁场(比地球磁场小得多)与地球磁场相互作用,使指南针按地球磁场进行南北方向的排列。然而,磁性原子核与磁场之间的相互作用就比较复杂,但情况与此相似。

在不有外界磁场的情况之下,尽管人体内部所有质子都具有磁性,但是这些质子的自旋轴在人体内部的排列是无序的,以至于它们之间的磁矩相互抵消,总磁矩等于 0。所以,人在平时并不体现具有磁性的现象。而当人体处于外界强磁场中,通过质子与外界磁场的相互作用,使人体内部的所有质子进行定向排列。由于质子在外界磁场下只能取顺主磁场或逆主磁场两个方向,其表现同指南针相近,但质子在外界磁场中的取向

不是完全与外界磁场方向相同,而是以一定夹角绕外磁场作进行。

质子与外界磁场作用后,根据量子力学的原理,其能量是量化的,每个质子只能取低能态或高能态之一,两个能级的能量之差为 $\Delta E = \gamma \hbar B_0$, $\hbar = h/2\pi$, h 为普朗克常数, γ 为磁旋比, B_0 为主磁场强度。由此可知,主磁场 B_0 越大,质子之间的能量差也就越大,磁共振图像的质量和信噪比也就越好。质子是根据自身能量大小来决定处于何向状态,一般在常温情况之下,当磁共振扫描仪的主磁场为 1.5T 时,质子系统的低能量粒子数比高能量粒子数多 8/2 000 000。所以,在此稳定状态下,其总的净磁矩十分微弱,产生磁共振的信号也是非常微弱。

三、激励与磁共振

磁共振现象的产生,首先必须使高能级的质子数目多于低能级的质子数目。将质子从低能级移至高能级的过程,称为激励。由于磁共振的频率是在射频波段,所以对稳定状态下的质子系统进行激励时,也必须采用射频脉冲。

射频脉冲是一种射频磁场,也是交变磁场[旋转的电磁波,因为它的频率在无线电波段(radio frequency)之内,所以称之为射频脉冲]。

射频脉冲用于激励平衡状态的原子核系统,使处于低能级的质子通过吸收射频的能量后,跃迁至高能级状态,从而达到高能级的质子数目多于低能级质子数,使质子系统处于受激状态。射频脉冲施加的方法是:在主磁场作用的基础上,用一个射频脉冲从 XOY 平面内的 OX 轴射出,为了使原子核系统能吸收射频磁场发出的能量,射频磁场的能量 E 必须与质子的能级差 ΔE 完全相等,也就是 $E = \Delta E$,由于 $E = \hbar \omega_r$ 和 $\Delta E = \gamma \hbar B_0$,其中 ω_r 为激励射频磁场频率, ω_0 为质子共振频率,所以 $\omega_r = \gamma B_0 = \omega_0$ 。这是磁共振基本公式,也称为拉莫(Lamor)公式。它要求在系统达到共振时, ω_r 必须与 ω_0 相同(ω_0 和参与共振的原子核及磁场强度有关),质子才能吸收射频磁场的能量从能量低的状态跃迁到能量高的状态。这个公式将具有磁性的核、外界主磁场和激励射频磁场联系起来。

每一种具有磁性的原子核在磁场中的共振频率是不同的。对于氢质子核来说, $\gamma = 26.75 \times 10^7 \text{T}^{-1} \text{s}^{-1}$,若磁共振扫描仪的磁场强度为 1.0T,则 ω 是 42.58MHz。

四、磁化矢量强度

前面,我们所讨论的是单个质子在外界磁场中共振的微观情况,每个质子在外界磁场中的取向不能任意,只能是两种状态中的一种。但是,我们都是观察在一定体积范围内所有质子在外界磁场作用之下的整体运动的宏观情况。

在质子系统处于平衡状态下时,由于所有质子在 XOY 平面内是随机分布的,低能级的质子数目多于高能级的数目,通过矢量叠加,得到所有质子磁矩的合磁矩,称为磁化矢量,用 M 表示。平衡状态下的磁化矢量用 M_0 表示。 M_0 的方向是沿着 Z 轴(主磁场的方向),此时 M 没有横向磁化矢量分量(用 M_{xy} 表示)。但实际上,每个质子仍都在绕主磁场进动。由于各个质子磁矩的横向分量的无序性,导致了 $M_{xy} = 0$,所以在宏观上只有总的纵向磁化矢量分量(用 M_z 表示), $M_z = M_0$ 。

当质子从低能级跃迁至高能级时,整个质子系统的相位一致(有序排列),体现在射频脉冲作用后,出现一个很强的 M_{xy} ,使受激原子核系统处于激发状态。当射频脉冲结束后,这些激发状态的原子核会将从射频磁场中所吸收的能量以电磁波形式向周围组织散发,回复至平衡状态,这个过程就是弛豫(relaxation)。

五、弛豫过程和弛豫时间

弛豫过程是磁共振系统特有的一个物理过程,不同的共振核,它们的 M_z 和 M_{xy} 的弛豫速度是不同的, M_z 的恢复过程称为纵向弛豫过程, M_{xy} 的恢复过程称为横向弛豫过程。

横向弛豫过程和纵向弛豫过程是两个机理完全不同的弛豫过程。

(一) 纵向弛豫过程, T_1 弛豫时间

90°脉冲使 M_z 消失(能级 E_1 与 E_2 上粒子数相等)而处于激发状态,但这是不稳定的,当射频磁场关闭后, M_z 又要回到原来的稳定状态,将共振所吸收的能量释放出来,这个过程称为纵向弛豫过程或自旋-晶格弛豫过程。

这是因为质子从高能级回到低能级时,通过热交换将共振所吸收的能量释放给周围的其他种类的原子核或晶格(磁共振一开始是用来研究原子核在其他种类的原子核环境中的运动规律,因此晶格就一直被用来表示其周围的其他种类的原子核),所以它是一个能量交换的过程。

它的恢复过程是一个指数上升的曲线。纵向弛豫速度越慢,曲线越平坦。它可以用一个时间常数 T_1 来客观描述。纵向弛豫时间 T_1 的定义:当 M_z 从0开始恢复到最大值 M_{z0} 的63%时所需的时间。当恢复时间为 $2T_1$ 时, M_z 恢复至最大值的87%;当恢复时间为 $3T_1$ 时, M_z 恢复至最大值的95%;当恢复时间为 $4T_1$ 时, M_z 恢复至最大值的98%,基本上恢复至稳定状态。各种组织的 T_1 反映了各组织纵向弛豫过程的快慢, T_1 越长,弛豫越慢; T_1 越短,弛豫越快。生物组织的 T_1 值范围一般为300~1000ms之间。

(二) 横向弛豫过程, T_2 弛豫时间

90°脉冲结束后, M_{xy} 增大,使所有系统内的质子处于同一个相位,当射频磁场关闭后,整个系统开始相散, M_{xy} 迅速下降,这个过程称为横向弛豫过程或自旋-自旋弛豫过程。

这一过程是质子与质子之间(同种核)的相互作用。由于每个质子具有一个微小的磁矩,因此每个质子都要对其周围的其他质子产生影响;反之,每一个质子也都处于其周围的质子的微磁场内,每个质子实际上受到的磁场是这些微磁场和主磁场的叠加。由于每个质子所处的具体环境不同,实际上是处于不同的磁场强度下,这种磁场强度的不均匀,是由于原子核系统产生的,导致每个质子的自旋频率有微小差异,产生相散,所以这是原子核系统固有的现象。除此之外,质子与质子之间也发生能量的交换,交换的结果会导致相位上的无序性。所以横向弛豫过程是一个自发的过程。

横向弛豫过程是按指数规律变化的过程,横向弛豫过程性,该曲线越弯曲,可用客观的时间常数 T_2 来描述。横向弛豫时间 T_2 的定义为: M_{xy} 下降到最大值的37%所需要的时间。当衰减时间为 $2T_2$ 时, M_{xy} 衰减至最大值的13%;当衰减时间为 $3T_2$ 时, M_{xy} 衰减至最大值的5%。时间常数 T_2 反映了不同组织的横向弛豫过程快慢,横向弛豫过程越快, T_2 就越短;横向弛豫过程越慢, T_2 就越长。生物组织的 T_2 一般在50~100ms之间。

(三) 表观横向弛豫过程, T_2' 弛豫时间

由于局部主磁场的均匀性,使磁场的均匀程度增加,质子自旋频率的差异增大,使相散加快,引起横向弛豫过程速度也加快,使测得的 T_2' 与理论上的 T_2 有一定误差,所以用 T_2' 来表示组织的实际横向弛豫过程快慢(T_2' 比 T_2 小),称为表观横向弛豫时间。

因此,我们接收到的只是按 T_2' 规律变化的信号,测出的是 T_2' 的大小,而不是 T_2 的大小。所以,主磁场的均匀度会影响 T_2' 图像的质量。 T_2' 与 T_2 越接近,说明了主磁场均匀度越高,磁共振扫描仪的性能就越好。

六、磁共振信号

M_{xy} 的恢复过程是在快速进动的同时,因相散的作用,其幅度也在迅速降低,所以是一个螺旋下降的过程,它在 XOY 平面中的运动会在接收线圈中感生出一个交变的电动势,这个信号就是磁共振的信号,我们称为自由感应衰减信号(*free induction decay, FID*)。它是一个幅度按 T_2' 指数规律变化的正弦波曲线(实际上是按 T_2' 规律变化的)。

当 M_{xy} 在 XOY 平面内转动时,每当它朝向接收线圈时,就能收到一个正信号;当它背向接收线圈转时,收到一个负信号。

(黑龙江省鸡西矿业集团总医院 魏晓刚)