

· 基础研究 ·

膝后交叉韧带双束重建术中股骨隧道定位的计算机辅助设计研究

李永奖¹, 张美超², 刘敏¹, 蔡春元¹, 林瑞新¹, 周德彪¹

(1. 温州医科大学附属第三医院骨科, 浙江 瑞安 325200; 2. 南方医科大学生物力学研究室, 广东 广州 510450)

【摘要】 目的: 采用现实虚拟互动技术及有限元分析法, 探讨膝关节后交叉韧带双束重建术中股骨隧道合理定位及重建术后移植固定膝关节力学响应。方法: 取新鲜冰冻膝关节标本 5 具, 用实验与计算机仿真相结合的方法, 重建膝关节三维计算机模型, 以实验获得的外部结构运动指标操纵此模型, 真实再现人体膝关节屈伸运动。分析模型内部股骨与胫骨关节面在此运动过程中的空间位置变化情况, 分别在后交叉韧带前外侧束 (ALB) 和后内侧束 (PMB) 股骨端附丽区选取前、后、中、近、远 10 个测试点, 选取胫骨端止点中点, 利用软件 Geomagic 计算连接两关节面各两点间的长度变化。将模型导入软件 Ansys, 采用四面体单元建立起股骨-胫骨复合体的有限元模型, 模拟人体行走中单腿着地情况对模型施加自身重冲击载荷, 分析关节面的受力情况。结果: 计算机还原出各运动角度下膝关节骨性结构的形态, 软件 Geomagic 的几何计算功能能准确测量股骨各点与胫骨止点间在关节内的长度变化, ALB 和 PMB 相同测试点在不同角度所得关节面两点间长度变化平均值间有显著性差异 ($P < 0.05$); 且同一角度不同测试点所得数据间亦有显著性差异 ($P < 0.05$)。ALB 各点中以 A2 变化最小 (1.35 ± 0.19) mm, A1 变化最大 (5.41 ± 1.22) mm, A2 和 A3 点比较, 差异无统计学意义 ($P = 0.913 > 0.05$); PMB 各点中以 B3 点变化最小 (1.95 ± 0.04) mm, B1 变化最大 (5.23 ± 2.21) mm, 只有 A2、A3 和 B3 点变化范围在 2 mm 以内。结论: 通过计算机技术能够建立可供分析测量的膝关节模型, 能准确的对交叉韧带的长度进行测量。在后交叉韧带双束重建中, 前外侧束应以其股骨附丽区上缘的中点 (即近测试点) 为中心钻孔; 后内侧束应以其股骨附丽区上缘 (即近测试点) 为中心钻孔建立股骨骨隧道。模型为进一步评价重建等长点偏差对术后移植固定力学环境影响的研究提供基础。

【关键词】 后交叉韧带; 有限元分析; 生物力学

DOI: 10.3969/j.issn.1003-0034.2015.02.015

Femoral tunnel positioning in posterior cruciate ligament double-bundle reconstruction by computer aided design LI Yong-jiang*, ZHANG Mei-chao, LIU Min, CAI Chun-yuan, LIN Rui-xin, and ZHOU De-biao. *Department of Orthopaedics, the Third Affiliated Hospital of Wenzhou Medical University, Rui'an 325200, Zhejiang, China

ABSTRACT Objective: To study mechanical affect of knee joint of reasonable positioning of femoral tunnel during knee posterior cruciate ligament (PCL) double-bundle reconstruction and graft fixation after reconstruction by virtual reality interactive technology and evaluate the biomechanical response of knee after reconstruction by finite element analysis. **Methods:** Knee specimens from five fresh frozen cadavers were used. Computer simulations and biomechanical experiments were used in this study. Experiments on flexion and extension movements of the knee joint were performed on specimens of fresh human knee joint. Laser three dimensional scanning was used to record and calculate the indexes of movements. Three-dimensional models of knee joint bone structure were then reconstructed on computer with the experimental data. Simulations of flexion and extension movements were carried out on the models to show the spatial positions of femur and tibia and label the attachment sites of PCL. Ten test points in the anterior, posterior, proximal, distal at the femoral attachment area of anterior and lateral bundle (ALB) and postoposterior medial bundle (PMB) were selected and the central points of tibial en attachment areat anchored. The distance btween each two points of two article surface was calculated and contacted by software of Geomagic. Model was import software Ansys, adopting the tetrahedron unit a finite element model of complex tibial and femoral was set up to simulat human walking in one leg, on this condition the the joint surface force of model under weight impact load were analyzed. **Results:** The three-dimensional models could demonstrate the spatial positions of the bone structure of the knee in different flexions and extensions. The models could be used to measure the spatial distance between 2 points on the femoral and

基金项目: 温州市科技计划项目 (编号: Y20110162)

Fund program: Supported by the grants from Science Foundation from Sci-Tech Committee of Wenzhou City (No. Y20110162)

通讯作者: 李永奖 E-mail: jointli@163.com

Corresponding author: LI Yong-jiang E-mail: jointli@163.com

tibial planes by software Geomagic. There was significantly difference among the length changes of anterolateral bundle and posteromedial bundle at every fixed point with different flexion angles ($P < 0.05$), so the fixed angle with different points. The length changes of anterior lateral bundle's A2, A1 and posterior medial bundle's B3, B1 points were (1.35 ± 0.19) mm, (5.41 ± 1.22) mm, (1.95 ± 0.04) mm and (5.23 ± 2.21) mm, respectively. The A2 and B3 points' length changes were the less, and that of the A1 and B1 points were the more. It had no significant difference between the length changes of anterior lateral bundle's A2 and A3 point ($P = 0.913 > 0.05$). All of the maximal length changes of anterior lateral bundle's A2, A3 and posterior medial bundle's B3 points were less than 2 mm. **Conclusion:** The models of knee joint were builded through computer technology and it can be measure the lenth of cruciate ligament with software Geomagic exactly. The femoral tunnel for the PCL double-bundle reconstruction should be located as follows: ALB at the middle point of upper edge of femoral attachment site (proximal point), while PMB at the middle point of femoral attachment site (proximal point). This model provides a satisfactory method for the evaluation of the biomechanical response of knee after cruciate ligament reconstruction.

KEYWORDS Posterior cruciate ligament; Finite element analysis; Biomechanics

Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2015, 28(2): 162-167 www.zggszz.com

膝关节交叉韧带损伤是运动损伤中多发的急性损伤之一,后交叉韧带 (posterior cruciate ligament, PCL) 损伤占 5%~20%, 临床上主张早期或晚期行交叉韧带重建手术^[1-3], 临床最常用的是双束股骨双隧道重建技术, 对于 PCL 双束重建一般采用各束止点中心定位法, 即将隧道定位于前外侧束 (anterolateral bundle, ALB) 与后内侧束 (posteromedial bundle, PMB) 股骨止点的中心点, 而其中心点远非其等长点^[4-8]。本实验采用现实虚拟互动技术, 通过对真实再现新鲜人体膝关节屈伸运动模型 PCL 股骨附丽区上各点对移植物长度变化影响的计算分析, 掌握其更为详细的等距特性资料, 为临床双束重建 PCL 的治疗提供参考。

1 材料与方法

1.1 膝关节标本准备

新鲜冰冻膝关节标本 5 具 (股骨远端及胫骨近端保留 20 cm), 男性 3 例, 女性 2 例; 左侧 2 例, 右侧 3 例; 死亡年龄 40~78 岁, 平均 65 岁; 先行 X 线检查确定为正常结构。利用聚甲基丙烯酸甲脂分别包埋股骨下段和胫骨上段, 包埋块为高 8 cm、直径 12 cm 的立方体。包埋后用多层保鲜膜包裹后置于 -20 °C 恒温冰柜中冷冻保存, 试验前 6 h 室温下解冻。

1.2 膝关节屈曲三维运动模型建立

1.2.1 膝屈曲运动指标测量 在股骨和胫骨体上利用克氏针打上“立方体”形标志物 (此标志物在膝关节运动中相对其所附骨体静止无运动), 然后安放于材料测试系统 Bio 858 型试验机上, 胫骨端包埋块置于试验台固定装置中, 股骨端包埋块置于试验机的加载盘中, 后者可根据试验要求随机转动某一角度。在本研究中, 把膝关节站立位角度记录作为膝关节运动起始位置 (0°), 然后每运动 10° 作为一种运动状态, 共 13 种情况 (0°~120°)。对于每一种运动状态, 利用激光三维扫描设备 (Realscan Mode 1200) 对标本进行表面扫描 (主要是标志物部分), 对扫描点

云文件进行记录保存。

1.2.2 膝关节骨性结构重建与运动还原 运动试验完成后, 去除膝关节关节囊及各类韧带, 保留“立方体”形标志物及关节面软骨, 并对后交叉韧带 ALB 及 PMB 在股骨和胫骨关节面的附丽区进行标记, 然后对分离的股骨和胫骨再次进行完整的表面激光三维扫描, 并通过软件 Geomagic 6.0 进行点云处理, 建立完整的股骨、胫骨表面模型, 此模型是重建各运动状态下膝关节骨性结构运动信息的基础。

1.2.3 交叉韧带附丽区的标记 根据试验中膝关节后交叉韧带附丽区的解剖及大体观察 (图 1), 在计算机模型上交叉韧带附丽区所在范围进行标记。本试验把后交叉韧带附丽区股骨端分别以双束中点为圆心 (A0、B0), 以 5 mm 为半径, 在前、后、近、远各取 4 点 (A1、B1; A2、B2; A3、B3; A4、B4), 胫骨端取总止点的中点作为测量的指标 (图 2)。

1.3 交叉韧带附丽区的两点间长度测量

利用 Geomagic 软件几何计算功能分别测量模型中各个运动状态下交叉韧带附丽区两点间的三维空间距离 (图 3) (为方便比较两点间长度变化, 规定起始距离为 0, 大于起始长度标记为正; 小于起始长度标记为负, 每 10° 记录 1 个数据)。每个点按照所取得的运动模型均测量 5 次, 取相同角度所得数据的均数为纵坐标, 以屈伸角度为横坐标, 绘成曲线图。并比较各测试点最大均数之间的差异, 从而分别找出 PCL 双束的相对等长点。

1.4 等长重建术后力学评价

将模型相关信息导入有限元软件 Ansys 10.0, 建立有限元几何模型 (图 4), 模拟人体行走中单腿着地情况对模型施加自身体重冲击载荷, 分析关节面的受力情况, 初步研究模型中移植物和膝关节面的应力、应变分布及变化情况, 描绘股骨、胫骨关节面的 Vion Mises 应力分布图, 从而评价膝关节交叉韧带等长重建的质量。

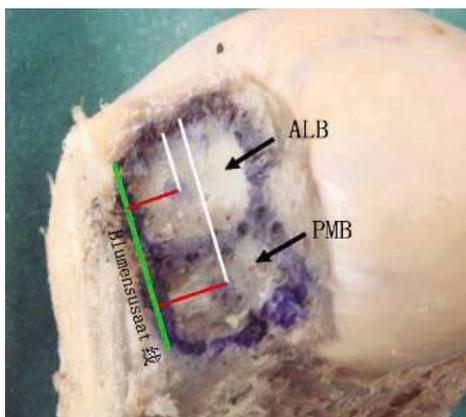


图 1 膝后交叉韧带前外侧束(ALB)和后内侧束(PMB)股骨附丽区大体观察

Fig.1 Anatomical observation of femoral attachment of the PCL's anterolateral bundle (ALB) and posteromedial bundles(PMB)

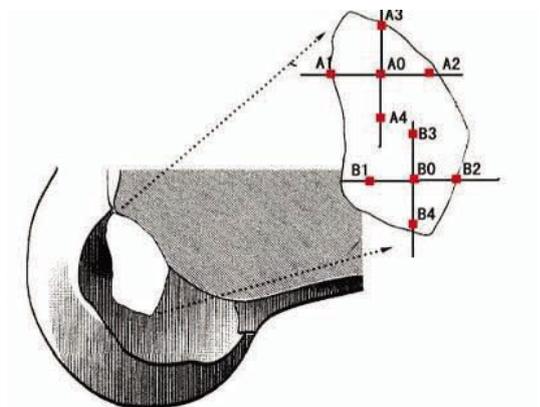


图 2 股骨附着处测试点选择示意图

Fig.2 PCL's test points of the femur attachment region

1.5 统计学处理

采用 SPSS 16.0 统计软件进行分析, 数据以均数±标准差表示。股骨端各个测试点之间采用完全随机资料的方差分析及 LSD 法两两比较。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 膝关节屈曲三维运动模型

计算机还原出膝关节屈曲运动过程中骨性结构的三维位置形态, 真实地记录和再现膝关节三维运



图 3 模型上关节面两点间距离测量

Fig.3 The distances of two points of articular surface on model

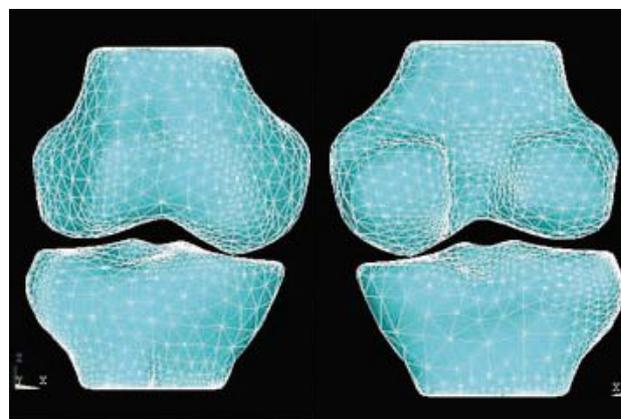


图 4 膝关节股骨-胫骨复合体有限元模型

Fig.4 Finite element model of femur-tibia composite

动过程, 从空间结构和力学功能两方面更精确、合理地确定重建等长点。在软件 Geomagic 6.0 中, 通过对股骨、胫骨表面模型及各运动状态下扫描的“立方体”形标志物进行图像匹配, 还原出各运动角度下股骨和胫骨的空间形态和相对位置(图 5)。

2.2 膝关节后交叉韧带双束关节内长度变化

膝关节在屈曲 $0^\circ \sim 120^\circ$ 范围内, 取 PCL 双束股骨止点上不同测试点时, 关节面两点长度变化见表 1-2。ALB 和 PMB 相同测试点在不同角度所得关节面两点间长度变化值间差异有统计学意义 ($P <$



图 5 模型在膝关节不同屈曲角度下的变化

Fig.5 Knee models on different flexion angles

表 1 膝关节屈曲过程中前外侧束各个测试点间长度测量结果($\bar{x}\pm s$, mm)

Tab.1 The length changes among test points of anterior lateral bundle with the knee joint inflexion($\bar{x}\pm s$, mm)

膝关节屈曲角度(°)	测试点(n=5)					F 值	P 值
	A0	A1	A2	A3	A4		
0	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	-	-
10	0.04±0.01	0.05±0.03	-0.12±0.02	-0.15±0.04	0.17±0.02	3.12	<0.05
20	0.26±0.02	0.12±0.02	-0.26±0.04	-0.24±0.03	0.47±0.02	3.56	<0.05
30	0.35±0.01	0.21±0.03	-0.42±0.06	-0.62±0.07	0.81±0.09	3.55	<0.05
40	0.45±0.03	0.37±0.03	-0.61±0.04	-0.78±0.07	1.05±0.09	3.16	<0.05
50	0.62±0.03	0.49±0.04	-0.62±0.03	-0.58±0.08	1.22±0.11	3.81	<0.01
60	0.76±0.01	1.77±0.07	-0.27±0.04	0.39±0.06	1.57±0.16	6.61	<0.01
70	1.01±0.04	1.86±0.08	0.37±0.02	0.52±0.04	1.91±0.07	4.53	<0.01
80	1.17±0.07	2.02±0.35	0.88±0.15	0.65±0.08	2.08±0.12	3.35	<0.05
90	1.68±0.10	3.16±0.34	1.07±0.56	0.87±0.22	2.30±0.40	2.66	<0.05
100	1.76±0.28	4.72±0.35	1.13±0.30	1.12±0.25	2.45±0.30	2.78	<0.05
110	2.04±0.85	5.31±1.05	1.34±0.08	1.39±0.80	2.60±0.35	3.25	<0.05
120	2.52±0.88	5.41±1.22	1.35±0.19	1.83±1.00	3.69±0.68	4.12	<0.01
F 值	3.78	4.13	2.57	2.81	7.12		
P 值	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.01		

表 2 膝关节屈曲过程中后内侧束各个测试点间长度测量结果($\bar{x}\pm s$, mm)

Tab.2 The length changes among test points of posterior medial bundle with the knee joint inflexion($\bar{x}\pm s$, mm)

膝关节屈曲角度(°)	测试点(n=5)					F 值	P 值
	B0	B1	B2	B3	B4		
0	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	-	-
10	0.04±0.02	0.29±0.05	0.20±0.07	0.11±0.08	0.18±0.03	3.11	<0.05
20	0.13±0.07	0.38±0.02	0.37±0.01	0.37±0.01	0.43±0.10	3.34	<0.05
30	0.21±0.11	0.45±0.09	1.01±0.08	0.46±0.09	0.57±0.10	3.71	<0.05
40	0.26±0.12	0.50±0.08	1.49±0.13	0.68±0.06	1.00±0.08	4.68	<0.01
50	1.40±0.13	0.81±0.03	1.99±0.33	0.95±0.05	1.50±0.34	3.75	<0.01
60	1.48±0.67	0.97±0.11	2.22±0.34	1.14±0.24	1.87±0.24	4.43	<0.01
70	1.81±0.10	1.41±0.12	2.52±0.35	1.22±0.26	2.11±0.34	2.78	<0.05
80	2.26±0.22	1.91±0.18	2.71±0.37	1.41±0.17	2.78±0.45	2.61	<0.05
90	2.52±0.26	2.75±0.40	2.80±0.28	1.60±0.17	3.07±0.67	3.01	<0.01
100	2.82±0.55	3.05±0.96	2.92±1.00	1.71±0.35	3.65±1.01	5.13	<0.01
110	3.17±0.40	4.01±0.80	3.11±0.78	1.82±0.89	4.05±1.10	4.32	<0.01
120	3.46±0.80	5.23±2.21	3.48±1.12	1.95±0.04	4.32±0.98	2.88	<0.05
F 值	5.13	6.34	5.87	3.71	7.81		
P 值	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.01		

0.05);且同一角度不同测试点数据间差异亦有统计学意义($P<0.05$)。以膝关节屈曲角度为横坐标,连接关节面两点间长度变化值为纵坐标,绘制双束关节内平均变化值的长度变化曲线(见图6-7)。由图6可知,ALB各点中以A2变化最小(1.35±0.19)mm,A1变化最大(5.41±1.22)mm,其中A2和A3点长度随膝关节屈曲先出现缩短,为负值,屈曲到60°后转为正值,后逐渐上升,总的变化范围均在2mm以内,其中对A2和A3进行两两比较,差异无统计学

意义($P=0.913>0.05$);由图7可知,PMB各点中以B3点变化最小(1.95±0.04)mm,B1变化最大(5.23±2.21)mm,其中只有B3变化范围在2mm以内,余均超过2mm。A2、A3和B3点可作为等长重建点。

2.3 应力分布

股骨、胫骨关节面 Vion Mises 应力分布见图8。

3 讨论

3.1 本研究模型的特点

本试验对新鲜标本进行解剖,结合大体观察,在

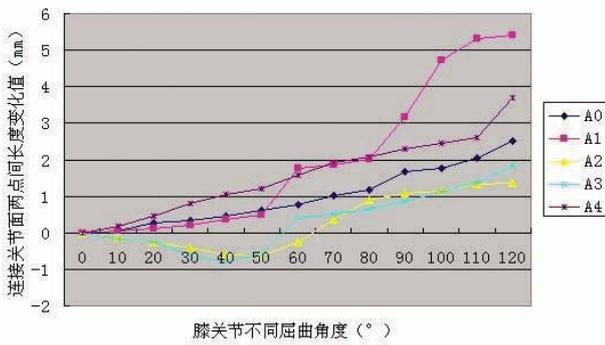


图 6 膝关节屈曲过程中前外侧束各个测试点间长度变化

Fig.6 The length changes among test points of posterior medial bundle with the knee joint inflexion

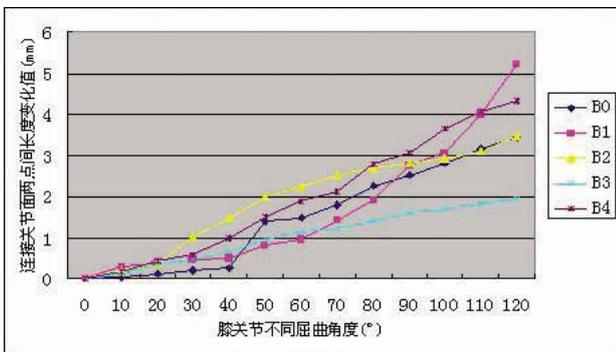


图 7 膝关节屈曲过程中后内侧束各个测试点间长度变化

Fig.7 The length changes among test points of posterior medial bundle with the knee joint inflexion

计算机模型中标记交叉韧带附丽区位置，每束 5 个点圆形分布设计较好地覆盖附丽区面积，采用先进的现实虚拟互动技术，把生物力学试验与计算机仿真技术结合起来，真实再现模拟正常交叉韧带在体的情况，能更好地测量动态屈曲过程中附丽区上各点之间的距离变化，在测量方法上有了进一步的改进，应用计算机技术可解决由于测量工具所带来的

影响，减小了误差；建立起形象、逼真、可供研究应用的计算机模型^[9]，也从交叉韧带附丽区比较选择出重建等长点的理想位置。将实验结果与有限元结构力学仿真计算相结合，通过有限元力学仿真分析，可以进行韧带重建术后膝关节的生物力学研究。

3.2 PCL 双束股骨端附丽区重建等长点选择

近年来，各种双束重建技术被广泛应用到关节镜下 PCL 重建术中^[1-3]，而临床最常用的主要还是双束股骨双隧道重建技术，即在 PCL 双束股骨端止点处各钻一隧道，分别引入 2 根移植物，胫骨止点仍采用单隧道或 Inlay 技术。由于 PCL 的解剖结构和生物学特性的复杂性，术中双束隧道的合理选择被认为是直接影响重建手术成败的关键因素之一^[10]。选择合适的等长点将使连接移植物两端的股骨点和胫骨点间的距离在术后保持恒定，以避免术后因移植物在关节活动时受到不同张力而引起膝关节僵硬、移植物被过度拉伸而松弛和两端固定失败等并发症发生。研究表明，交叉韧带在断裂前可被拉长约 2~3 mm。因此，替代物长度在术后 2 mm 以内的变化仍被视为等长，这一标准也为大家广泛接受并采纳^[7,9-10]。以往学者对前交叉韧带等长重建点进行了大量相关研究^[8]，已基本达成共识，但对于后交叉韧带等长重建的研究相对较少，Markolf 等^[2]将 PCL 股骨止点视为一个椭圆，用钢丝将其前、上、中、下各点与胫骨止点中点相连，测量膝关节 0°~120°活动范围关节内钢丝长度变化的大小，发现最等长的为上测试点，中、远两点也可为临床接受，前测试点最不等长，因此认为 PCL 重建时应以其股骨止点上缘中点为中心建立骨隧道，尽量避免在止点前缘定位。Grood 等^[11]通过计算机感应系统发现 PCL 股骨止点的上缘各点为等长点，且前后的误差可以接受。

本试验对新鲜标本进行解剖，结合大体观察，在计算机模型中标记交叉韧带附丽区的位置，利用软件 Geomagic 的几何计算功能测量模型中各个运动状态下交叉韧带附丽区两点间的三维空间距离，减小了试验误差。由于 PCL 胫骨止点对等长的影响很小，可忽略不计^[9-12]，影响等长的决定因素是股骨止点，因此试验中在 PCL 双束的股骨端止点上选取了 10 个测试点，而胫骨端只选了 1 个点。根据本试验结果，PCL 前外侧束后点 (A2)、近点 (A3) 和后内侧束近点 (B3) 这 3 点虽不是绝对等长点，但其变化范围均在 2 mm 以内，达到生理等距的标准。与前期实体标本测试结果在数值上有所不同，但在

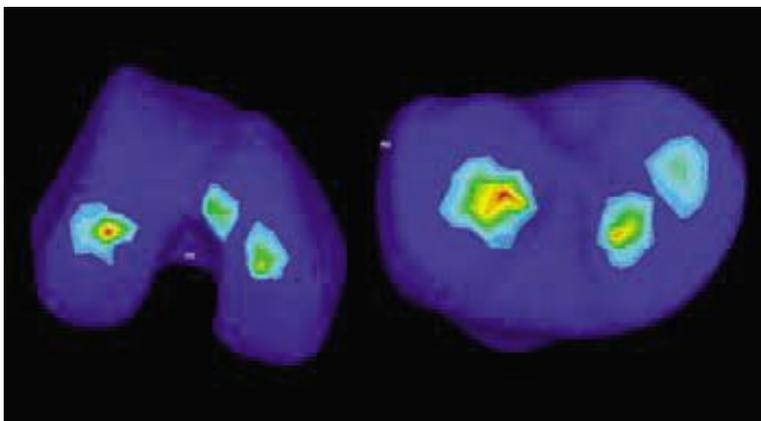


图 8 股骨与胫骨关节面在冲击载荷下的关节面 Vion Mises 应力分布

Fig.8 Vion Mises stress distribution of the articular surface of femoral and tibial on impact load

膝关节屈曲过程中展示出相似的等距特性^[12]。在屈曲过程中,前外侧束与后内侧束的纤维束呈交替紧张,分别经历了松弛—紧张—松弛、紧张—松弛—紧张的过程,发挥防止胫骨后移的作用,与 Amis 等^[13]的结果相似。在这个过程中,PCL 的各纤维不断重新组合,使一部分纤维呈紧张状态,发挥稳定膝关节的作用,另一部分纤维处于休息状态,可见前外侧束和后内侧束的分束更多的是一个功能束的概念。理论上前外侧束的后点和近点都可以作为等长定位点,但由于后内侧束上只有近点这 1 个点符合等长点的要求,考虑到两隧道的距离不能过近,否则容易造成隧道壁骨折或塌陷^[14],所以临床上在行后交叉韧带双束重建时最佳骨隧道的定位,前外侧束应以其股骨止点上缘的中点(即近测试点 A3)为中心钻孔,后内侧束以其股骨止点上缘(即近测试点 B3)为中心钻孔建立股骨骨隧道,而前外侧束钻孔中心根据术中需要可向后缘偏移靠近后点(即 A2 点)。

由于采取的实验条件及定位方法不同,导致结果差异较大,结果的可比性受到影响。如 Kurosawa 等^[15]在实验中除保留髌腱、膈肌、内外侧副韧带以外,切除了膝关节周围所有的软组织,这样会影响膝关节的稳定,直接影响到了试验的结果及试验的真实性。Grood 等^[11]虽然采用计算机测量系统,但并没有直接测量 PCL 附着点间的真正变化值。本试验并没有打开膝关节囊,最大限度减小由于缺乏膝关节周围软组织而造成膝关节不稳带来试验结果误差的影响。但受标本数量,未考虑标本屈曲时产生的内、外旋转,缺乏模拟髌骨在屈曲过程中的作用等因素的制约,使结果受到一定的局限,有待于更多同类研究及临床进一步的验证。

采用虚拟现实仿真技术测量膝关节交叉韧带等长点能切实有效解决问题并达到研究的目的,突破传统测量工具的局限,在研究方法上提供新的思路,也为进一步评价理想等长点位置的偏差对术后移植术物固定力学环境的影响提供准确可靠的基础。

参考文献

- [1] 黄迅悟,彭伟,冯会成,等.保留残端纤维双束重建后交叉韧带的病例对照研究[J].中国骨伤,2013,26(5):360-364.
Huang XW, Peng W, Feng HC, et al. Case-control studies on double bundle posterior cruciate ligament reconstruction with remnant fiber preservation [J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2013, 26(5): 360-364. Chinese with abstract in English.
- [2] Markolf KL, Jackson SR, McAllister DR. Single-versus double-bundle posterior cruciate ligament reconstruction; effects of femoral tunnel separation[J]. Am J Sports Med, 2010, 38(6): 1141-1146.
- [3] Kohen RB, Sekiya JK. Single-bundle versus double-bundle posterior cruciate ligament reconstruction[J]. Arthroscopy, 2009, 25(12): 1470-1407.
- [4] Markolf KL, Feeley BT, Jackson SR, et al. Biomechanical studies of double-bundle posterior cruciate ligament reconstructions[J]. J Bone Joint Surg Am, 2006, 88(8): 1788-1794.
- [5] Petersen W, Lenschow S, Weimann A, et al. Importance of femoral tunnel placement in double-bundle posterior cruciate ligament reconstruction: biomechanical analysis using a robotic/universal force-moment sensor testing system[J]. Am J Sports Med, 2006, 34(3): 456-463.
- [6] Montgomery SR, Johnson JS, McAllister DR, et al. Surgical management of PCL injuries: indications, techniques, and outcomes[J]. Curr Rev Musculoskelet Med, 2013, 6(2): 115-123.
- [7] Tsukada H, Ishibashi Y, Tsuda E, et al. Biomechanical evaluation of an anatomic double-bundle posterior cruciate ligament reconstruction[J]. Arthroscopy, 2012, 28(2): 264-271.
- [8] 董伊隆,蔡春元,姜文辉,等.前交叉韧带解剖重建股骨隧道的应用解剖学研究[J].中国骨伤,2013,26(9):757-759.
Dong YL, Cai CY, Jiang WH, et al. Anatomical study on the femoral tunnel anatomy reconstruction of anterior cruciate ligament[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2013, 26(9): 757-759. Chinese with abstract in English.
- [9] 姜楠,黄文华,张美超,等.虚拟现实互动技术在交叉韧带等长重建计算机辅助设计中的应用[J].中华创伤骨科杂志,2007,9(6):536-538.
Jiang N, Huang WH, Zhang MC, et al. Application of virtual reality interactive technology in computer aided design of cruciate ligament isometric reconstruction[J]. Zhonghua Chuang Shuang Gu Ke Za Zhi, 2007, 9(6): 536-538. Chinese.
- [10] Voos JE, Mauro CS, Wentz T, et al. Posterior cruciate ligament: anatomy, biomechanics, and outcomes[J]. Am J Sports Med, 2012, 40(1): 222-231.
- [11] Grood ES, Hefzy MS, Lindenfield TN. Factors affecting the region of most isometric femoral attachments. Part I: The posterior cruciate ligament[J]. Am J Sports Med, 1989, 17(2): 197-207.
- [12] 刘敏,林瑞新,杨国敬,等.PCL 双束重建术中股骨隧道定位对移植术物等距特性的影响[J].医用生物力学,2009,24(6):434-438.
- [13] Liu M, Lin RX, Yang GJ, et al. Isometricity of grafts in PCL reconstruction under femoral tunnel shifting condition[J]. Yi Yong Sheng Wu Li Xue, 2009, 24(6): 434-438. Chinese.
- [14] Amis AA, Gupta CM, Bull AM, et al. Anatomy of the posterior cruciate ligament and the meniscofemoral ligaments[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2006, 14(3): 257-263.
- [15] 徐雁,印钰,王健全,等.自体腘绳肌腱单束及双束重建治疗后交叉韧带损伤的回顾性临床对比研究[J].中华外科杂志,2013,51(3):247-251.
Xu Y, Yin Y, Wang JQ, et al. Comparison of single and double bundle isolate posterior cruciate ligament reconstruction with hamstring autograft[J]. Zhonghua Wai Ke Za Zhi, 2013, 51(3): 247-251.
- [16] Kurosawa H, Yamakoshi K, Yasuda K, et al. Simultaneous measurement of changes in length of the cruciate ligaments during knee motion[J]. Clin Orthop Relat Res, 1991, (265): 223-240.

(收稿日期:2013-12-20 本文编辑:王玉曼)