

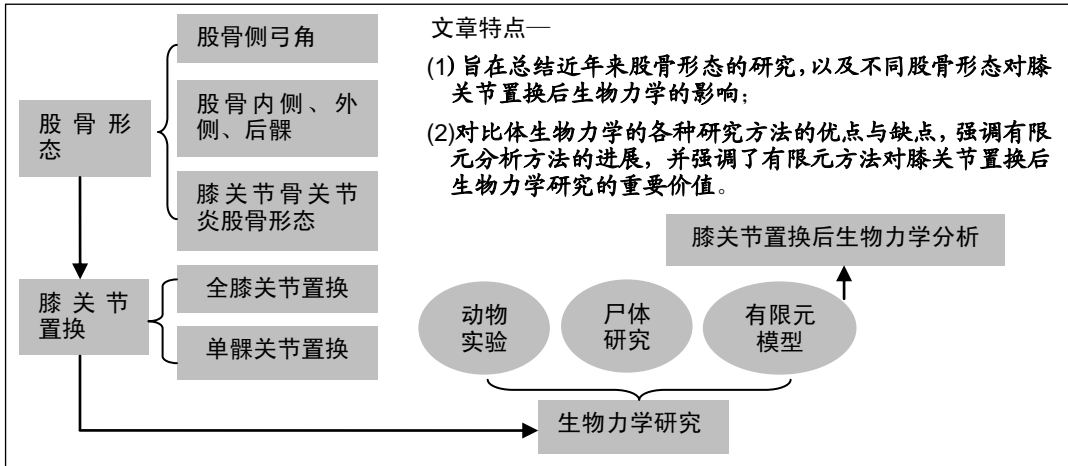
从生物力学角度认识股骨解剖结构对膝关节置换的影响

李超, 程静波, 冯明利(首都医科大学宣武医院骨科, 北京市 100053)

DOI:10.3969/j.issn.2095-4344.2914

ORCID: 0000-0002-4625-7640(李超)

文章快速阅读:



文章特点一

- (1) 旨在总结近年来股骨形态的研究, 以及不同股骨形态对膝关节置换后生物力学的影响;
- (2) 对比生物力学的各种研究方法的优点与缺点, 强调有限元分析方法的进展, 并强调了有限元方法对膝关节置换后生物力学研究的重要价值。

李超, 男, 1990年生, 山西省太原市人, 汉族, 2014年大连医科大学毕业, 首都医科大学在读硕士, 医师, 主要从事骨关节疾病、创伤骨科研究。

通讯作者: 冯明利, 博士, 主任医师。首都医科大学宣武医院骨科, 北京市100053

文献标识码:A

投稿日期: 2020-03-01

送审日期: 2020-03-10

采用日期: 2020-04-23

在线日期: 2020-06-08



文题释义:

膝关节骨关节炎: 是一种以退行性病理改变为基础的疾患, 多患于中老年人群, 其症状多表现为膝盖红肿痛、上下楼梯痛、坐起立行时膝部酸痛不适等。

股骨: 是人体中最大的长管状骨, 可分为一体两端, 用于支撑人体的躯干及骨盆等。

摘要

背景: 关节置换已成为重度膝关节骨关节炎治疗的主要方法之一, 而股骨形态在关节置换中的作用日益受到重视, 通过有限元分析股骨形态对关节置换后生物力学的影响。

目的: 简述股骨解剖学特性及膝关节置换研究进展, 通过有限元分析法对不同股骨形态对膝关节置换后生物力学影响的进展。

方法: 通过输入“股骨形态, 股骨解剖形态, 股骨侧弓角, 膝关节骨关节炎, 膝关节置换术, 全膝关节置换术, 单髁关节置换术, 生物力学, 有限元分析, total knee arthroplasty, unicompartmental knee arthroplasty, finite element analysis”等关键词, 利用计算机检索万方、维普、CNKI、PubMed、Elsevier和Web of Science数据库, 通过阅读标题和摘要进行初步筛选, 排除与主题相关度低的文献, 最终共纳入102篇文献进行结果分析。

结果与结论: ①股骨形态在不同人种、不同性别中存在较大差异; ②不同股骨形态行膝关节置换时对股骨髓内定位杆插入点、股骨外翻截骨角度、胫骨截骨角度等均产生影响; ③有限元分析相比于早期生物力学分析方法及体外实验的操作性更强, 并且以已成为骨科生物力学研究的首选方法, 通过有限元分析方法对股骨形态对膝关节置换的影响具有独特优势, 被越来越多的人重视。

关键词:

骨; 股骨; 膝; 膝关节; 骨关节炎; 关节置换; 生物力学; 有限元分析

中图分类号: R459.9; R318; R687.4

Biomechanical study of the effect of femoral anatomy on knee arthroplasty

Li Chao, Cheng Jingbo, Feng Mingli (Department of Orthopedics, Xuanwu Hospital, Capital Medical University, Beijing 100053, China)

Li Chao, Master candidate, Physician, Department of Orthopedics, Xuanwu Hospital, Capital Medical University, Beijing 100053, China

Abstract

BACKGROUND: Joint arthroplasty has become one of the main methods in the treatment of severe knee disease. The effect of femur shape on joint arthroplasty has been paid more and more attention. The influence of femur shape on biomechanics after joint arthroplasty was analyzed by finite element method.

OBJECTIVE: To summarize the anatomical characteristics of femur and the research progress of knee arthroplasty, and to analyze the influence of different femur shapes on the biomechanics of knee arthroplasty by finite element method.

METHODS: The key words were “femur shape, femur anatomical shape, femur side arch angle, knee

Corresponding author: Feng Mingli, MD, Chief physician, Department of Orthopedics, Xuanwu Hospital, Capital Medical University, Beijing 100053, China

osteoarthritis, knee arthroplasty, total knee arthroplasty, unicompartmental knee arthroplasty, biomechanics, finite element analysis". A computer was used to retrieve Wanfang, VIP, CNKI, PubMed, Elsevier and Web of Science. Through the preliminary screening of reading titles and abstracts, the literatures with low relevance to the theme were excluded, and 102 literatures were finally included for the result analysis.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) The femur shape has great difference in different race and sex. (2) The different shape of femur has influence on the insertion point of femoral intramedullary positioning rod, osteotomy angle of femoral valgus, and osteotomy angle of tibia. (3) Compared with the early biomechanical analysis, the finite element analysis method is practical and flexible *in vitro* experiment, with strong operability and has become the first choice of orthopedic biomechanics research. The finite element analysis method has a unique advantage in the influence of femur shape on knee arthroplasty, which has been paid more and more attention.

Key words: bone; femur; knee; knee joint; osteoarthritis; joint arthroplasty; biomechanics; finite element analysis

0 引言 Introduction

膝关节骨关节炎已成为全球最常见的关节疾病之一,其发病率与年龄成正相关,中国40岁以上中老年人膝关节骨关节炎总体患病率随年龄增长由6.5%逐渐增加至36.4%,男性患者由4.3%增加至27.3%,女性患者则由8.8%增加至42.7%^[1],可导致严重的疼痛和残疾,最终丧失劳动能力。目前膝关节置换已成为治疗晚期膝关节骨关节炎及严重膝关节损伤最有效的方法之一。在临床实践中,假体的选择对置换后假体生存率有重要得影响,若选择不当可造成应力分布不均匀、假体松动和疼痛等并发症。国内外学者通过不同的研究方法对股骨形态进行研究,均发现股骨解剖结构形态存在一定的差异,可以引起假体匹配不良、稳定性差及关节功能降低等术后并发症,从而影响患者生活质量。

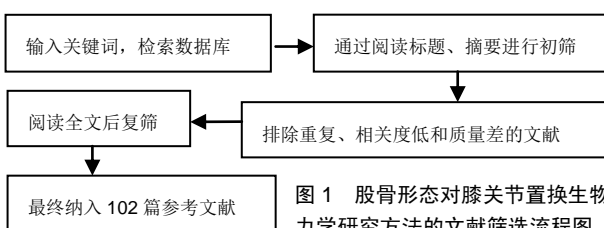
文章通过生物力学研究股骨解剖学结构对膝关节置换的影响进行综述,为假体设计及临床应用提供参考。

1 资料和方法 Data and methods

1.1 资料来源 由第一作者计算机检索万方、维普、CNKI、PubMed、Elsevier和Web of Science数据库文献。中文检索词:“股骨形态、股骨解剖形态、股骨侧弓角、膝关节骨关节炎、膝关节置换术、全膝关节置换术、单髁关节置换术、生物力学、有限元分析”,英文检索词:“total knee arthroplasty, unicompartmental knee arthroplasty, finite element analysis”等。

1.2 入选标准 包含了股骨解剖形态、膝关节骨关节炎、膝关节置换及生物力学研究的相关文献,研究方向契合度大、内容有实质性帮助,被广泛认可的文献。

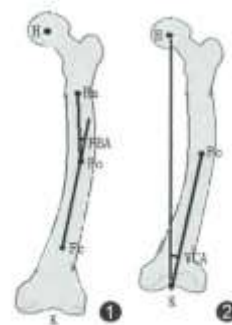
1.3 文献质量评估 共检索到3 272篇文献,其中中文文献980篇,英文文献2 292篇,排除与研究目的的相关性差及内容陈旧、重复的文献,最终纳入102篇符合标准的文献进行综述。见图1。



1.4 数据的提取 研究内容由3人独立提取并通过讨论解决分歧。

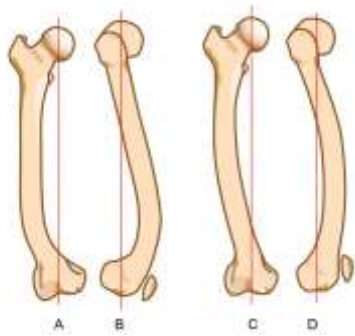
2 结果 Results

2.1 股骨形态的概述 人类股骨形态呈圆弧状弯曲状^[2],可分为股骨上段、中段和远端。股骨上段髓腔存在着2个弯曲,股骨髓腔上部弯曲是朝后,下部弯曲朝前的,这说明股骨上段具有一定的弧度。在股骨中段,股骨弓向前,股骨髓腔呈开口向后的弧形,所以整个髓腔形态从侧位片上呈“S”形^[3],股骨中段弯曲主要通过侧弓角度体现^[4-6]。股骨侧弓角的测量方法见图2。有研究发现人类股骨侧弓角的平均值为 $(4.88\pm 1.24)^\circ$ ^[7],但不同人种之间股骨侧弓角度并不相同。有研究发现非裔美国人股骨侧弓角较亚洲人和白种人小,并且认为人种间股骨侧弓角的差异是由于股骨长度所造成的^[4]。有研究发现黑色人种的股骨曲率半径大于白色人种,说明黑色人种的股骨侧弓角度要大于白色人种^[8];有研究对100例股骨进行了分析,得出股骨前弓半径的平均值为108 cm,且该值与性别、年龄无关^[9]。有学者通过对426例股骨CT进行研究,得出股骨的前弓半径为 (971.44 ± 211.68) mm,且男性大于女性^[5]。有研究出日本人股骨曲率半径在矢状面为175 mm,冠状面为2 640 mm^[10]。有研究对中国人的股骨形态经行研究后得出中国人股骨的外侧轮廓就像一根曲棍球棒的形状并且股骨曲率半径大于日本人^[11],见图3。中国北方地区人群中股骨侧弓的平均值为 $(1.4\pm 2.4)^\circ$,股骨外翻角为 $(6.5\pm 1.3)^\circ$ ^[12]。



图注:①股骨侧弓角(FBA)测量;
②股骨外翻角(VCA)测量^[6]
图2 股骨侧弓角及股骨外翻角的测量方法

股骨远端解剖形态较复杂,有韧带和肌肉附着。股骨远端由内侧髁、外侧髁、髌面及髌间窝组成。股骨内外侧髁不对称,朱志刚等^[13]通过螺旋CT对膝关节进行重建后得出男性与女性股骨远端解剖形态存在差异,女性股骨、



图注: 图 A, B 为中国人矢状位及冠状位股骨形态; C, D 为日本人矢状位及冠状位股骨形态^[11], 中国人股骨曲率半径大于日本人
图 3 中国人和日本人股骨形态比较

股骨前髁向前突出的距离均比男性小。有研究也通过CT断层扫描和三维重建测量了中国人股骨远端形态得出相似的结论, 并且证明女性的股骨后髁角较男性大^[14]。国外学者通过研究进一步证实男性与女性在股骨前内侧、外侧髁高度有明显差异^[15-16]。有研究对中国人股骨髁参数测量后得出中国人的膝关节尺寸明显小于欧美等国家的膝关节尺寸。有研究认为膝关节大小与身高呈正相关, 男性膝关节明显大于女性膝关节^[17-18]。

综上所述, 股骨形态不仅在不同人种之间具有较大差别, 在相同人种不同身高、性别和年龄之间都具有较大差别。上述研究中大多数研究者早期通过X射线进行下肢全长片拍摄后对股骨形态进行分析, 但X射线片因其放大率以及股骨拍摄角度不同所带来的误差可导致结果不准确。通过CT扫描可以避免上述误差, 目前越来越多的研究者通过CT扫描建模的方法对不同股骨形态进行生物力学的分析。

2.2 膝关节骨关节炎患者的股骨形态 膝关节骨关节炎患者常常查体可见下肢内翻或者外翻畸形。有研究对93例膝关节骨关节炎患者股骨侧弓角分析后得出62%的膝关节骨关节炎患者为外弓, 18%的膝关节骨关节炎患者为内弓, 只有20%的患者股骨外弓程度在 $(0\pm 2)^\circ$ 以内, 得出膝关节骨关节炎患者股骨侧弓角畸形较常见^[19]。MULLAJI等^[20]的研究中也得到了相似的结果, 他们通过膝关节骨关节炎患者与健康人膝关节对比后, 发现膝关节骨关节炎患者比健康对照组的股骨外弓角度要大, 并且膝关节骨关节炎患者股骨远端解剖轴与机械轴夹角要大于健康人群。有研究对13 546例膝关节骨关节炎患者经术前CT扫描^[21], 得出与MULLAJI等^[20]相似结果。MOCHIZUKI等^[22]对169例膝关节骨关节炎患者分析得出患有膝关节骨关节炎的女性股侧弓角度更大; LU等^[23]研究证明随着关节炎的进展, 与男性相比女性股骨形态变化更加明显, 尤其是股骨侧弓角、股骨远端外翻截骨角、关节会聚角都会有明显增加。NAGAMINE等^[24]对患有膝关节骨关节炎的日本人群进行研究后得出超过50%的患者有较大股骨侧弓角和外翻角。有研究对女性膝关节骨关节炎患者与健康人群进行对比后发现膝关节骨关节炎患者股骨远端轴线与正常人群不同, 主要体现在髁间窝区域, 女性膝关节骨关节炎患者股骨髁间窝区域变形程度高^[25]。有研

究证明膝关节骨关节炎患者股骨髁间窝比正常人小^[26], SHEPSTONE等^[27]进一步证明膝关节骨关节炎患者股骨髁间窝为扁平状。因此, 与健康人相比膝关节骨关节炎患者股骨形态变化范围更大, 在重度骨关节炎人群中, 进行膝关节置换, 必须考虑股骨形态的影响。

2.3 膝关节置换的研究进展 膝关节置换为症状较重、发作频率增高、影像学表现有显著间隙变窄或关节畸形的重度膝关节骨关节炎患者首选治疗方式^[28-30]。膝关节置换分为人工全膝关节置换与膝关节单髁置换。

2.3.1 全膝关节置换发展与适应证 GUNSTON^[31]于1969年发明了多中心假体, 这是最早出现的膝关节假体之一, 但是术后假体松动成为最主要的问题。1971年, COVENTRY等^[32]发明了几何学型假体, 其优点就是假体的生物力学更匹配关节, 但是同样没有解决假体松动的问题。直到1973年, 有研究者发明了全髁型假体(TCP假体), 由此开创了人工膝关节发展的黄金时期, 之后还出现了旋转平台假体。1978年, 有研究者又发明了后方稳定型的假体, 这也是迄今为止最成功的膝关节假体之一。全膝关节置换的假体可分为非限制性的假体、半限制性的假体及完全限制性的假体, 又可细分为全髁型假体、后交叉韧带保留型、后交叉韧带替代型等等类型。目前后交叉韧带保留型和后稳定型2类是中国初次置换假体最常用的类型。

全膝关节置换的患者适用情况为: ①骨关节炎活动严重障碍者; ②膝关节出现严重的多间室病变者; ③由前、后交叉韧带损伤所致的骨关节炎合并膝关节严重不稳者; ④侧副韧带完整者。

2.3.2 膝关节单髁置换发展与适应证 膝关节单髁置换最早出现于20世纪50年代, 但由于人们对于膝关节骨关节炎的认识不足, 认为膝关节骨关节炎必然累积内外双间室, 加上全膝关节置换的稳定效果和早期膝关节单髁假体创新型不足以及手术难度高等特点, 使膝关节单髁置换并未广泛用于膝关节骨关节炎的治疗。然而, 有研究发现, 大多数膝关节骨关节炎为单间室骨关节炎, 并非累积其他间室^[33], 这一论点也得到很多文献的支持。在对既往行全膝关节置换的患者的研究中发现有5%-20%为单间室病变, 其中以内侧间室为主^[33]。这使人们提出一个问题: 是否真的需要全膝关节置换才能获得临床治疗膝关节骨关节炎的成功呢? 随着对膝关节骨关节炎的深入研究, 人们发现在膝关节骨关节炎发生的3个间室中, 多以内侧间室受累严重, 其他2个间室只是轻度受累, 原因可能为膝关节60%-70%负荷由膝关节内侧间室传导, 且在膝关节内外旋时主要以内侧间室为支点, 内侧间室所承受压力较另外两个间室大^[33]; 随着单髁假体的不断创新改进, 尤其是第3代牛津膝关节假体的出现, 使得膝关节单髁置换治疗膝关节单间室骨关节炎的优势被重新认识, 所以对于单间室骨关

炎患者来说,全膝关节置换是过度治疗,也是对钱财的浪费^[34]。目前,临床常用的单髁假体包括固定平台和活动平台2种假体,其在设计理念上有所区别,临床应用也各有优缺点^[35-36]。通过对比得出活动平台膝关节单髁假体比固定平台膝关节单髁假体矫正下肢冠状面力线的角度更大,对于恢复下肢解剖学力线更具优势^[37],所以目前临床多以活动平台单髁假体治疗单间室膝关节骨关节炎。

牛津单髁小组认为可进行膝关节单髁关节置换的理想患者为:①前内侧间室骨性关节炎;②可复性关节内内翻畸形;③前交叉韧带完好;④外侧间室软骨完好,排除风湿性关节炎患者。而年龄、体质量指数可不作为手术禁忌证^[38]。

膝关节置换对重度膝关节骨关节炎患者有明显的治疗效果,术后可有效缓解患者疼痛症状,改善患者的膝关节功能,提高生活质量。术后假体10年生存率为91.4%-98.0%^[39-40]。但当两种术式的适应证重叠时目前首选膝关节单髁置换治疗,因为其具有创伤小、不干扰膝关节其他正常或近乎正常的部分、术后康复快等优势,并且术后更为接近自然膝关节的运动状态,有些甚至可以满足高强度的运动需要^[33, 41]。

2.4 股骨形态对关节置换的影响 股骨形态与股骨解剖轴线密切相关,因为股骨解剖轴线为股骨中段和下端骨皮质中点的连线,所以不同股骨形态的解剖轴线并不相同。在关节置换中股骨解剖轴线被股骨髓内定位杆的位置所显示,而股骨髓内定位杆的位置又决定了股骨假体的位置。研究表明股骨髓内定位杆插入点偏差7 mm 则导致髓内定位杆与股骨解剖轴线偏差3°-10°,所以股骨髓内定位杆插入点是影响术后假体位置最关键的因素^[42-45]。

膝关节单髁置换中股骨髓内定位杆插入点的选择依据牛津微创置换操作手册:股骨髓内定位杆插入点必须在股骨髁间窝前内缘的前方1 cm处,且紧贴股骨髁间窝内壁内侧,指向髁前上棘^[46-47],见图4。这样可以保证术后下肢力线<0°,因为术后下肢力线内翻>5°则会加速聚乙烯衬垫的磨损;而过度外翻将导致外侧软骨磨损^[48-49];下肢力线内翻>8°就有可能导致假体脱位或松动,甚至需进行早期翻修。牛津微创置换操作手册并未对股骨形态的不同而选择不同股骨髓内定位杆插入点经行说明,这就导致术中需要手术医师依据经验进行选择^[50]。有研究对股骨髓内定位杆的位置经行研究后发现冠状位上股骨髓内定位杆与股骨髓腔解剖轴线呈外侧交角,平均角度为0.96°;在矢状位上呈后方交角,平均角度为0.13°^[51]。MA等^[52]对20具尸体经行研究后得出在冠状面时股骨解剖轴距股骨髁间窝中心3.7 mm。蔡骏丰等^[47]基于单髁关节置换的尸体骨研究得出,中国人股骨平均外翻角约5.1°,最大7.78°,最小3.78°,并且该研究认为股骨髓内定位杆插入点的理想位置应在髁间窝最高点与髁间窝内侧缘中间距髁间窝水平线前方约1.46 cm的位置。



图注:左图为膝关节单髁关节置换中股骨髓腔内定位杆插入点^[46-47];右图为全膝关节置换中股骨髓腔内定位杆插入点^[57]

图4 膝关节置换中形态

全膝关节置换的股骨髓内定位杆插入点常选在交叉韧带股骨止点前方约1 cm处,见图3。有研究者在较早发表的一篇数学建模研究中提出冠状面股骨解剖轴距股骨髁间窝中心0-12 mm,平均距离6.6 mm,同时他也提到髓内杆偏离股骨髓腔中线常常会导致术后下肢力线外翻^[53]。该观点也被JEFFERY等^[54]所证实,但是,JEFFERY等^[54]的术中测量数据显示股骨开髓点的位置平均偏外3.4 mm。李乐翔等^[55]运用三维CT扫描模拟定位骨髓内定位得出股骨髓内定位杆的插入点多集中于髁间窝偏内2-5 mm,髁间窝偏前3-10 mm。THIPPANNA等^[56]对侧弓角超过5°的膝关节进行了测量,其中62.5%侧弓为5°-8°,20.45%侧弓为9°-12°,17.05%侧弓大于12°,并且通过多元线性回归分析发现,股骨侧弓角度每增加1°,开髓点外移1.04 mm。SHI等^[57]认为股骨外翻角大于9°时股骨髓内定位杆的插入点也应向外侧移动。

股骨形态对股骨外翻角也会产生影响,股骨外翻角为股骨解剖轴与机械轴的夹角,在膝关节骨关节炎患者中股骨外翻角变化范围较大而且主要受股骨侧弓角的影响^[58-61]。全膝关节置换中股骨外翻截骨角度常固定为6°,但多数膝关节骨关节炎患者股骨侧弓角大于2°术中应增大股骨外翻截骨度数,如果使用固定的外翻截骨角度,股骨远端截骨的精准性降低^[19]。有研究也得出了相似的结果,即股骨侧弓角大于3°时,股骨外翻截骨角度应为(8.6±2.2)°^[62]。股骨形态不仅对全膝关节置换中股骨外翻截骨产生影响,同时也对外旋截骨有一定影响,目前全膝关节置换中股骨外旋截骨角度参照股骨后髁线水平,基本保持在3°左右,但人种和性别不同股骨后髁角度也不尽相同,西方人股骨后髁角外旋一般为3°左右^[63-64],而中国男性股骨远端后髁角为(5.1±1.9)°,女性的股骨远端后髁角为(5.8±1.8)°^[14],这结果与以往研究结果相似^[65]。膝关节单髁置换中股骨髓内定位杆与股骨导向器存在7°外翻和10°屈曲^[66],这是因为股骨解剖轴与下肢机械轴有7°夹角,并且多数关节外科医生术中依据股骨髓内定位杆的位置进行胫骨垂直截骨。所以对于不同股骨形态,在膝关节单髁置换中不仅影响股骨截骨角度,也会影响胫骨的截骨角度。

如何保证膝关节置换后关节假体在理想位置一直是外科医生研究的方向,这其中对及股骨解剖轴均大于

健康人群,应当在术前进行股骨解剖轴的测量,术中依据不同的股骨形态调整股骨髓内定位杆的插入点以及股骨和胫骨的截骨角度,这样术后膝关节假体才会处于合适的位置。目前股骨形态对膝关节单髁置换后假体位置以及生物力学的研究较少,并且主要依靠X射线片对股骨形态及假体位置进行评估,X射线片因其放大率以及拍摄角度不同所带来的误差可导致结果不准确,所以基于CT扫描建模的生物力学方法对股骨形态及关节置换的分析应运而生。

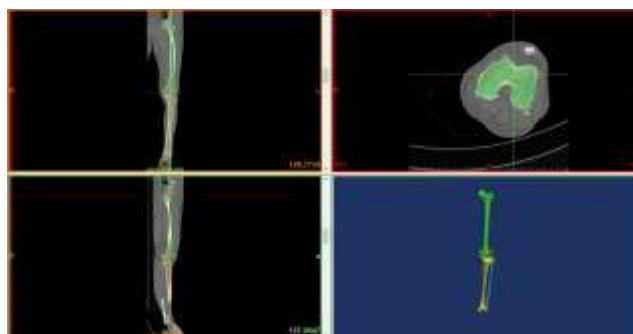
2.5 生物力学研究的概述 生物力学是应用力学原理和方法对生物中的力学问题进行分析,并应用于临床诊断和治疗。对于生物力学的分析主要分为2类:第一类是尸体标本文章,由于尸体标本获取的困难性,与活体之间的差异性、标本间的个体差异性限制了其研究的进一步发展^[67];第二类为活体研究,常用的方式可分为侵入性和非侵入性。侵入性研究是将特定的测量器植入人体,由于其对机体的损害性和伦理道德缺陷,难以广泛开展;非侵入性主要目前主流的为步态分析和有限元分析^[68-70],但因步态分析研究存在研究目标集中于外部结构的合力、力矩,无法对内部结构之间的力学特征进一步分析^[71-73],所以仍不是骨科生物力学研究的首选方法。

2.5.1 有限元分析方法简述 BREKELMANS等^[74]于1972年首次将有限元分析方法应用于骨科生物力学研究。经过40年演化,建立复杂的三位有限元模型及对模型进行复杂的生物力学分析已经日益成熟。虽然有限元分析有其自身的局限性,比如建模过程中材料属性和边界条件的设定、不同有限元分析软件的选择等均会对分析结果造成影响^[75-77],但与上述生物力学研究方法相比较,有限元分析法不须昂贵而复杂的实验设备,可自行定义各种复杂的边界条件,模拟关节动力学分析,对膝关节内部各种结构的应力、应变进行准确计算,操作性及可重复性强,并且有限元模型建立简单,与活体之间差异性小,对人体无侵入性等优势优势更加明显,所以目前有限元分析法现在已成为骨科生物力学研究的首选方法^[78-79]。

有限元分析方法的基本步骤大致为:①选定研究对象;②CT或MRI薄层扫描;③通过Mimics软件进行三维重建及网格划分,见图5;④通过Solidworks进行布尔操作模拟关节置换手术过程,见图6;⑤通过Abaqus软件对不同组织进行特定的材料属性赋值,设置特定的边界条件;⑥负荷加载;⑦有限元分析,见图7。

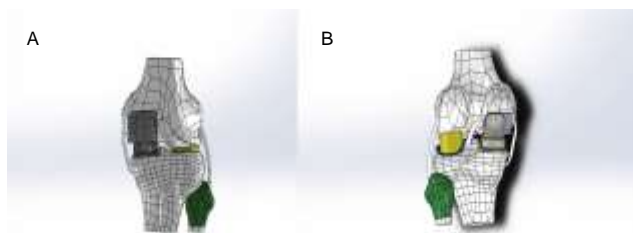
2.5.2 股骨有限元分析的研究 李峰等^[80]利用有限元方法分析人体股骨在载荷下的受力状态得出骨的应力由近端向远端逐渐升高,在股骨髁上方骨干中下1/3处达到最高,这一观点也被多数学者证明^[81-83]。杨挺等^[84]建立股骨有限元模型后对其进行不同步态时期的有限元分析得出站立相,股骨应力集中在小转子稍下方偏后

侧,在摆动相,应力集中在股骨中下段的内侧。



图注:图中左上,右上,左下,右下分别为Mimics软件中冠状面、水平面、矢状面、中下肢三维模型的图像

图5 Mimics软件构建下肢三维模型



图注:图A, B分别为Solidworks模拟膝关节单髁关节置换正面、背面观

图6 Solidworks模拟膝关节单髁关节置换图像

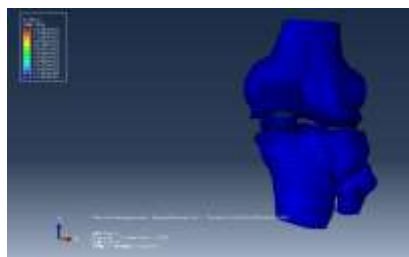


图7 Abaqus进行膝关节单髁关节置换的有限元分析图

2.5.3 有限元分析在膝关节单髁置换中的应用 目前国内外一些学者通过有限元分析法对有限元分析的生物力学进行研究。KWON等^[85]通过有限元分析对活动平台和固定平台术后受力分析进行比较,结果与KO等^[86]通过分析进行比较得出类似的结论,说明有限元分析方法在单髁手术中应用的准确性。KANG等^[87]运用有限元分析膝关节单髁置换后股骨假体位置对聚乙烯衬垫和关节软骨压力的影响,证明股骨远端中心是膝关节单髁置换后股骨假体安放的最佳位置,但也有研究证明股骨假体向外侧移动并不会引起聚乙烯衬垫磨损^[88]。HOPKINS等^[89]对内外侧单髁置换进行有限元分析得出内外侧单髁置换后可使膝关节运动学恢复至正常膝关节;有研究通过有限元方法研究关节线的升高与降低对聚乙烯衬垫、关节软骨及外侧半月板压力的关系,证明关节线在升高或降低6 mm时可产生较大的应力集中^[90];有研究建立了动态有限元模型,分析在不同屈曲程度下不同胫骨假体后倾对聚乙烯衬垫及髌骨关节的影响^[91],也证明髌骨在屈曲35°以上时随着胫骨假体后倾越大髌骨位置越向后移;INOUE等^[92]通过有限元对不同胫骨假体内、外翻情况进行假体的受力分析;有

限元不仅可以对术后关节假体受力进行研究,也可以对关节韧带受力进行研究。PE等^[93]通过有限元模型分析半月板和韧带在人体膝关节载荷传递和稳定性中;有研究通过3种不同厚度聚乙烯衬垫的膝关节进行建模随后对三种条件下的韧带、关节假体进行有限元分析^[94]。

2.5.4 有限元分析在全膝关节置换中的应用 有研究建立了膝关节有限元模型,分析不同载荷、不同屈曲角度下假体之间的接触面积和应力分布^[95]。BISCHOFF等^[96]建立膝关节三维有限元模型,研究该假体在上下楼梯和正常步态的膝关节应力、接触压力及接触面积。LIAU等^[97]研究2种不同全膝关节假体对位不准时聚乙烯衬垫上的压力影响。有研究发现胫骨假体安装时应轻度外翻,这样可以减少应力集中,并且胫骨假体在冠状面相对于中立位时外翻2°的平均应力与最大Mises力增加均小于假体内翻2°,这可能也会减少术后的胫骨前内侧的疼痛^[98-100]。

目前有限元分析方法作为骨科生物力学的主要分析方法已广泛应用于关节置换的研究当中,有限元分析方法既可以对膝关节置换的不同术式进行模拟、分析和对比,也可以对假体不同位置、不同载荷条件进行分析,甚至可以模拟膝关节在不同屈、伸位置的受力情况。目前对于股骨形态的有限元分析较少,而股骨形态对膝关节置换的生物力学研究更为少见。

3 总结与展望 Summary and prospect

最近20年中,对于重度膝关节骨关节炎的治疗,膝关节置换已取得了较满意的结果。当进行膝关节置换时,需要明确每种置换类型的适应证,因为膝关节置换后假体的位置十分重要,假体位置不理想可能会导致下肢力线过度矫正或则矫正不足,前者易造成外侧间室压力负荷过度集中,进而引起对侧间室骨关节炎;后者则易造成聚乙烯衬垫磨损和松动^[101-102]。影响假体位置的一个重要原因就是股骨形态,但目前多数关节外科医生并不重视股骨形态对假体位置的影响,股骨形态对股骨髓腔定位杆插入点的位置选择以及全膝关节置换中股骨外翻截骨角度的选择都有较大影响。采用固定的髓腔定位杆插入点和外翻截骨角度可导致假体与骨皮质接触不充分,产生应力遮挡,降低假体稳定性或者导致假体撞击、聚乙烯衬垫磨损等情况。

传统生物力学方研究股骨形态对关节置换影响的分析准确性较低。近年来,有限元分析法在骨科生物力学的研究中取得了广泛的应用,通过对文献回顾发现有限元分析法与传统生物力学分析方法相比,具有更高的精度、可重复性及安全性。但目前针对股骨形态对关节置换的影响有不足之处:第一,目前国内外关于不同形态股骨的有限元分析较少,而股骨形态对膝关节置换的生物力学研究更加少见;第二,目前大多数研究主要依

靠欧美人的股骨形态进行建模分析,未依据中国人的股骨形态进行研究,并且仅对股骨、胫骨假体内、外旋或内、外翻的位置经行分析,并未对假体同时存在上述2种情况进行分析;第三,大多数膝关节模型采用健康人群进行建模,而膝关节骨关节炎患者股骨形态变化范围大与健康人群的形态并不相同。

综上所述,关节置换后假体准确安放及准确重建下肢力线是膝关节置换的基本要求,也是影响膝关节假体远期临床效果的重要因素。虽然每种膝关节假体安放角度都有其允许范围,但如何针对不同股骨形态保证最佳安放角度仍需进行深入研究。不同股骨形态不仅对于膝关节置换后假体生存率有影响,而且也对肿瘤假体、创伤假体的设计及术后假体生存率都有影响。因此文章对膝关节假体的设计创新以及术中选择假体合理安放的角度从而进一步提高假体生存率都具有重要的参考意义。

作者贡献: 文章资料收集、成文和由第一作者完成,文章责任人为冯明利,由李超、程静波与冯明利参与审核。

经费支持: 该文章没有接受任何经费支持。

利益冲突: 课题未涉及任何厂家及相关雇主或其他经济组织直接或间接的经济或利益的赞助。

写作指南: 该研究遵守《系统综述和荟萃分析报告规范》(PRISMA指南)。

文章查重: 文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次查重。

文章外审: 文章经小同行外审专家双盲外审,同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

文章版权: 文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享4.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

4 参考文献 References

- [1] 帖小佳,郑如庚,赵梦,等.中国中老年人膝关节骨关节炎患病率的Meta分析[J].中国组织工程研究,2018,22(4):650-656.
- [2] BRUNS W, BRUCE M, PRESCOTT G, et al. Temporal trends in femoral curvature and length in medieval and modern Scotland. *Am J Phys Anthropol.* 2002;119(3):224-230.
- [3] 黄宁,魏杰,秦德安.股骨前弓角的临床意义[J].实用骨科杂志,2014,20(3):237-239.
- [4] MARATT J, SCHILLING PL, HOLCOMBE S, et al. Variation in the Femoral Bow: A Novel High-Throughput Analysis of 3922 Femurs on Cross-Sectional Imaging. *J Orthop Trauma.* 2013;28(1):6-9.
- [5] SU XY, ZHE Z, JING-XIN Z, et al. Three-Dimensional Analysis of the Curvature of the Femoral Canal in 426 Chinese Femurs. *Biomed Res Int.* 2015;2015:1-8.
- [6] MULLAJI AB, MARAWAR SV, MITTAL V. A comparison of coronal plane axial femoral relationships in Asian patients with varus osteoarthritic knees and healthy knees. *J Arthroplasty.* 2009;24(6):861-867.
- [7] OCAL MK, SABANCI SS, COBANOGLU M, et al. Anterior Femoral Bow and Possible Effect on the Stifle Joint: A Comparison between Humans and Dogs. *Anatomia Histol Embryol.* 2017;46(Suppl 1):391-396.
- [8] TRUELLE MB. Anterior femoral curvature revisited: race assessment from the femur. *J Forensic Sci.* 1999;44(4):700.
- [9] ZUBER K, SCHNEIDER E, EULENBERGER J, et al. Form and dimension of the bone marrow cavity of the human femur with reference to the fit of intramedullary implants. *Der Unfallchirurg.* 1988;91(7):314-319.
- [10] ABDELAAL AH, YAMAMOTO N, HAYASHI K, et al. Radiological assessment of the femoral bowing in Japanese population. *SICOT J.* 2016;2:2.

- [11] TANG WM, CHIU KY, KWAN MFY, et al. Sagittal bowing of the distal femur in Chinese patients who require total knee arthroplasty. *J Orthop Res.* 2005;23(1):41-45.
- [12] 吴伟,郭万首,程立明,等.股骨侧弓角的个体差异对全膝人工关节置换后下肢力线的影响[J].中华医学杂志,2017,21(11):1764-1769.
- [13] 朱志刚,金大地,罗吉伟,等.股骨远端解剖形态性别差异与假体形态设计的关系[J].中国临床解剖学杂志,2008,26(4):42-44.
- [14] 李梁.国人股骨远端形态的测量及其在全膝关节置换与假体设计中的意义[D].上海:第二军医大学,2012:1-46.
- [15] HUANG AB, WANG HJ, YANG B, et al. Intraoperative anthropomorphic study of anterior femoral condyles compared with sizing of femoral arthroplasty. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2016;24(4):1280-1285.
- [16] REILLY G, YANG B, YU JK, et al. Comparative Study of Sex Differences in Distal Femur Morphology in Osteoarthritic Knees in a Chinese Population. *PLoS One.* 2014;9(2):e89394.
- [17] HÖLLMER H. Bicompartamental versus total knee arthroplasty for medio-patellofemoral osteoarthritis: a comparison of early clinical and functional outcomes. *J Knee Surg.* 2013;26(6):411-416.
- [18] 刘朝晖,郭万首,张启栋,等.单髁置换与全膝关节置换治疗膝关节单间室骨性关节炎为主的早中期疗效比较[J].中华医学杂志,2010,90(37):2597-2600.
- [19] YAU W, CHIU K, TANG W, et al. Coronal bowing of the femur and tibia in chinese: its incidence and effects on total knee arthroplasty planning. *J Orthop Surg.* 2007;15(1):32-36.
- [20] MULLAJI AB, MARAWAR SV, MITTAL V. A comparison of coronal plane axial femoral relationships in asian patients with varus osteoarthritic knees and healthy. *Knee.* 2009;24(6):861-867.
- [21] MERIC G, GRACITELLI GC, ARAM LJ, et al. Variability in distal femoral anatomy in patients undergoing total knee arthroplasty: measurements on 13,546 computed tomography scans. *J Arthroplasty.* 2015;30(10):1835-1838.
- [22] MOCHIZUKI T, TANIFUJI O, KOGA Y, et al. Sex differences in femoral deformity determined using three-dimensional assessment for osteoarthritic knees. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2017;25(2):468-476.
- [23] LU Y, ZHENG Z L, LV J, et al. Relationships between morphological changes of lower limbs and gender during medial compartment knee osteoarthritis. *J Orthop Surg.* 2019;11(5):835-844.
- [24] NAGAMINE R, KONDO K, IKEMURA S, et al. Distal femoral cut perpendicular to the mechanical axis may induce varus instability in flexion in medial osteoarthritic knees with varus deformity in total knee arthroplasty: a pitfall of the navigation system. *J Orthop Sci.* 2004;9(6):555-559.
- [25] ŞAHİN N, ÖZDEMİR ST, OCAKOĞLU G, et al. Is axial shape of distal femur different in normal and osteoarthritic female patients? *Joint Dis Relat Surg.* 2016;27(2):68.
- [26] WADA M, TATSUO H, BABA H, et al. Femoral intercondylar notch measurements in osteoarthritic knees. *Rheumatology.* 1999;6(6):6.
- [27] SHEPSTONE L, ROGERS J, KIRWAN JR, et al. Shape of the intercondylar notch of the human femur: a comparison of osteoarthritic and non-osteoarthritic bones from a skeletal sample. *Ann Rheum Dis.* 2001;60(10):968-973.
- [28] 陈加荣,李凭跃.膝关节骨性关节炎的阶梯治疗原则[J].中国骨科临床与基础研究杂志,2018,10(1):53-57.
- [29] 张军,孙磊.关节镜治疗膝骨性关节炎的临床分析[J].中国矫形外科杂志,2010,18(11):895-898.
- [30] 蒋尧传,蒋就喜,唐志宏,等.膝骨性关节炎的关节镜手术治疗[J].中国骨与关节损伤杂志,2010,25(3):259-260.
- [31] GUNSTON FH. Polycentric knee arthroplasty: prosthetic simulation of normal knee movement. *J Bone Joint Surg Br Vol.* 1971;53(2):272-277.
- [32] COVENTRY MB, FINERMAN GM, RILEY LH, et al. A New Geometric Knee for Total Knee Arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res.* 1972;83(94):157-162.
- [33] 张新安,连鸿凯,刘云涛,等.单髁置换术与全膝关节置换术治疗膝关节内侧面骨性关节炎的近期疗效比较[J].中国临床新医学,2019,12(11):1213-1217.
- [34] EPINETTE JA, BRUNSCHWEILER B, MERTL P, et al. Unicompartamental knee arthroplasty modes of failure: wear is not the main reason for failure: a multicentre study of 418 failed knees. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2012;98(6):S124-S130.
- [35] MÜLLER PE, PELLENGAHR C, WITT M, et al. Influence of minimally invasive surgery on implant positioning and the functional outcome for medial unicompartamental knee arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2004;19(3):296-301.
- [36] PAPAIOANNOU TA, DIGAS G, BIKOS C, et al. Femoral neck version affects medial femorotibial loading. *ISRN Orthop.* 2013;2013:328246.
- [37] 沙宇,韩晓峰,胡彬,等.活动平台与固定平台单髁置换后下肢力线的矫正效果比较[J].骨科临床与研究杂志,2019,4(6):329-332,364.
- [38] 凌晶,章军辉,狄正林,等.移动平台单髁置换术治疗膝关节内侧面骨性关节炎[J].中国骨与关节损伤杂志,2014,29(8):776-778.
- [39] VAN DER LIST JP, ZUIDERBAAN HA, PEARLE AD. Why Do Medial Unicompartamental Knee Arthroplasties Fail Today? *J Arthroplasty.* 2016;31(5):1016-1021.
- [40] DAI X, FANG J, JIANG L, et al. How does the inclination of the tibial component matter? A three-dimensional finite element analysis of medial mobile-bearing unicompartamental arthroplasty. *Knee.* 2018;25(3):434-444.
- [41] HOPKINS AR, NEW AM, RODRIGUEZ-Y-BAENA F, et al. Finite element analysis of unicompartamental knee arthroplasty. *Med Eng Phys.* 2010;32(1):14-21.
- [42] LIOW MH, TSAI TY, DIMITRIOU D, et al. Does 3-Dimensional In Vivo Component Rotation Affect Clinical Outcomes in Unicompartamental Knee Arthroplasty? *J Arthroplasty.* 2016;31(10):2167-2172.
- [43] 张催,陈游,张春雷,等.单髁置换术与全膝关节置换术治疗膝单间室骨性关节炎近中期疗效的对比研究[J].中华关节外科杂志(电子版),2010,4(2):51-56.
- [44] 李相伟,丁晶.Oxford单髁置换术的术后影像学评价及分析[J].中华关节外科杂志(电子版),2013,7(1):48-51.
- [45] NOVOTNY J, GONZALEZ MH, AMIROUCHE FML, et al. Geometric analysis of potential error in using femoral intramedullary guides in total knee arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2001;16(5):641-647.
- [46] TU Y, XUE H, MA T, et al. Superior femoral component alignment can be achieved with Oxford microplasty instrumentation after minimally invasive unicompartamental knee arthroplasty. *Knee Surg Sports Traumatol Arthroscopy.* 2017;25(3):729-735.
- [47] 蔡俊丰,马敏,罗树林,等.单髁关节置换术中股骨髓内定位杆插入点的解剖学研究[J].中华关节外科杂志(电子版),2017,11(5):511-515.
- [48] VASSO M, DEL REGNO C, D'AMELIO A. Minor varus alignment provides better results than neutral alignment in medial UKA. *Knee.* 2015;22(2):117-121.
- [49] BERGER AR. Results of Unicompartamental Knee Arthroplasty at a Minimum of Ten Years of Follow-up. *J Bone Joint Surg Am.* 2005;87(5):999-1006.
- [50] JENNY JY, BOERI C. Unicompartamental knee prosthesis implantation with a non-image-based navigation system: rationale, technique, case-control comparative study with a conventional instrumented implantation. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2003;11(1):40-45.
- [51] 杨涛,涂意辉,薛华明,等.单髁关节置换术股骨髓内定位对股骨假体力线影响的影像学研究[J].中国修复重建外科杂志,2019,33(1):8-12.
- [52] MA B, LONG W, RUDAN JF, et al. Three-dimensional analysis of alignment error in using femoral intramedullary guides in unicompartamental knee arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2006;21(2):271-278.
- [53] REED SC, GOLLISH J. The accuracy of femoral intramedullary guides in total knee arthroplasty. *J Arthroplasty.* 1997;12(6):677-682.
- [54] JEFFERY JA. Accuracy of intramedullary femoral alignment in total knee replacement: intraoperative assessment of alignment rod position. *Knee.* 1999;6(3):211-215.
- [55] 李乐翔,薛峰,盛晓文,等.膝关节置换时股骨髓内定位对假体排列的影响[J].中国组织工程研究,2016,20(4):481-485.
- [56] THIPPANNA RK, KUMAR MN. Lateralization of femoral entry point to improve the coronal alignment during total knee arthroplasty in patients with bowed femur. *J Arthroplasty.* 2016;31(9):1943-1948.
- [57] SHI X, LI H, ZHOU Z, et al. Comparison of postoperative alignment using fixed vs individual valgus correction angle in primary total knee arthroplasty with lateral bowing femur. *J Arthroplasty.* 2016;31(5):976-983.
- [58] MULLAJI AB, SHETTY GM, KANNA R, et al. The influence of preoperative deformity on valgus correction angle: an analysis of 503 total knee arthroplasties. *J Arthroplasty.* 2013;28(1):20-27.

- [59] BARDAKOS N, CILA A, THOMPSON B, et al. Mechanical axis cannot be restored in total knee arthroplasty with a fixed valgus resection angle: a radiographic study. *J Arthroplasty*. 2007;22(6 Suppl 2):85-89.
- [60] DEAKIN AH, BASANAGODAR PL, NUNAG P, et al. Natural distribution of the femoral mechanical-anatomical angle in an osteoarthritic population and its relevance to total knee arthroplasty. *Knee*. 2012;19(2):120-123.
- [61] NAM D, MAHER P A, ROBLES A, et al. Variability in the relationship between the distal femoral mechanical and anatomical axes in patients undergoing primary total knee arthroplasty. *J Arthroplasty*. 2013;28(5):798-801.
- [62] KIM JM, HONG SH, KIM JM, et al. Femoral shaft bowing in the coronal plane has more significant effect on the coronal alignment of TKA than proximal or distal variations of femoral shape. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2015;23(7):1936-1942.
- [63] BERGER RA, RUBASH HE, SEEL MJ, et al. Determining the Rotational Alignment of the Femoral Component in Total Knee Arthroplasty Using the Epicondylar Axis. *Clin Orthop*. 1993;286(286):40-47.
- [64] GRIFFIN FM, INSALL JN, SCUDERI GR. The posterior condylar angle in osteoarthritic knees. *J Arthroplasty*. 1998;13(7):812-815.
- [65] YIP DKH, ZHU YH, CHIU KY, et al. Distal rotational alignment of the Chinese femur and its relevance in total knee arthroplasty. *J Arthroplasty*. 2004;19(5):613-619.
- [66] JANG KM, LIM HC, HAN SB, et al. Does new instrumentation improve radiologic alignment of the Oxford? medial unicompartmental knee arthroplasty? *Knee*. 2017;24(3):641-650.
- [67] BALDWIN MA, CLARY CW, FITZPATRICK CK, et al. Dynamic finite element knee simulation for evaluation of knee replacement mechanics. *J Biomech*. 2012;45(3):474-483.
- [68] ANDRIACCHI TP, MÜNDERMANN A, SMITH RL, et al. A Framework for the in Vivo Pathomechanics of Osteoarthritis at the Knee. *Ann Biomed Eng*. 2004;32(3):447-457.
- [69] ASANO T, AKAGI M, NAKAMURA T. The functional flexion-extension axis of the knee corresponds to the surgical epicondylar axis: in vivo analysis using a biplanar image-matching technique. *J Arthroplasty*. 2005;20(8):1060-1067.
- [70] RAMOS A, SIMÕES JA. Tetrahedral versus hexahedral finite elements in numerical modelling of the proximal femur. *Med Eng Phys*. 2006;28(9):916-924.
- [71] BALIUNAS AJ, HURWITZ DE, RYALS AB, et al. Increased knee joint loads during walking are present in subjects with knee osteoarthritis. *Osteoarthritis Cartilage*. 2002;10(7):573-579.
- [72] LIKAVAINIO T, BRAGGE T, HAKKARAINEN M, et al. Gait and muscle activation changes in men with knee osteoarthritis. *Knee*. 2010;17(1):69-76.
- [73] VERIM Ö, TAŞGETIREN S, ER MS, et al. Anatomical comparison and evaluation of human proximal femurs modeling via different devices and FEM analysis. *Int J Med Robot*. 2013;9(2):e19-e24.
- [74] BREKELMANS WA, POORT HW, SLOOFF TJ. A new method to analyse the mechanical behaviour of skeletal parts. *Acta Orthop Scand*. 1972;43(5):301-317.
- [75] DONAHUE T LH, HULL ML, RASHID MM, et al. A finite element model of the human knee joint for the study of tibio-femoral contact. *J Biomech Eng*. 2002;124(3):273-280.
- [76] MEAKIN JR, SHRIVE NG, FRANK CB, et al. Finite element analysis of the meniscus: the influence of geometry and material properties on its behaviour. *Knee*. 2003;10(1):33-41.
- [77] PÉREZ-GONZÁLEZ A, FENOLLOSA-ESTEVE C, SANCHO-BRU JL, et al. A modified elastic foundation contact model for application in 3D models of the prosthetic knee. *Med Eng Phys*. 2008;30(3):387-398.
- [78] MOGLO KE, SHIRAZI-ADL AJK. Biomechanics of passive knee joint in drawer: load transmission in intact and ACL-deficient joints. *Knee*. 2003;10(3):265-276.
- [79] 白波, 罗林聪, 彭继侨. 有限元法在髌关节运动力学研究中的应用进展[J]. *国际骨科学杂志*, 2018, 39(1):24-27.
- [80] 李峰, 吴华. 基于DICOM数据构建股骨三维有限元模型的精确力学分析[J]. *中国组织工程研究*, 2013, 2017(30):5483-5489.
- [81] 汪金平, 杨天府, 钟凤林, 等. 股骨生物力学特性的有限元分析[J]. *中华创伤骨科杂志*, 2005, 7(10):931-934.
- [82] 刘安庆, 张银光, 王春生, 等. 人股骨生物力学特性的三维有限元分析[J]. *西安交通大学学报(医学版)*, 2001, 22(3):242-244.
- [83] VISURI T, HIETANIEMI K. Displaced stress fracture of the femoral shaft: a report of three cases. *Mil Med*. 1992;157(6):325-327.
- [84] 杨挺, 郑建河, 姚子龙, 等. 行走中股骨生物力学特性的有限元分析[J]. *广东医学*, 2016, 37(4):512-515.
- [85] KWON OR, KANG KT, SON J, et al. Biomechanical comparison of fixed- and mobile-bearing for unicompartmental knee arthroplasty using finite element analysis. *J Orthop Res*. 2014;32(2):338-345.
- [86] KO YB, GUJARATHI MR, OH KJ. Outcome of unicompartmental knee arthroplasty: a systematic review of comparative studies between fixed and mobile bearings focusing on complications. *Knee Surg Relat Res*. 2015;27(3):141-148.
- [87] KANG KT, JUHYUN S, YONG-GON K, et al. Effect of femoral component position on biomechanical outcomes of unicompartmental knee arthroplasty. *Knee*. 2018;25(3):491-498.
- [88] DUDLEY TE, GIOE TJ, SINNER P, et al. Registry outcomes of unicompartmental knee arthroplasty revisions. *Clin Orthop Relat Res*. 2008;466(7):1666-1670.
- [89] HOPKINS AR, NEW AM, RODRIGUEZ-Y-BAENA F, et al. Finite element analysis of unicompartmental knee arthroplasty. *Med Eng Phys*. 2010;32(1):14-21.
- [90] KWON OR, KANG KT, SON J, et al. Importance of joint line preservation in unicompartmental knee arthroplasty: Finite element analysis. *J Orthop Res*. 2017;35(2):347-352.
- [91] PATRICK W, MATTHIAS W, ARND S, et al. Increase in the Tibial Slope in Unicompartmental Knee Replacement: Analysis of the Effect on the Kinematics and Ligaments in a Weight-Bearing Finite Element Model. *Biomed Res Int*. 2018;2018:8743604.
- [92] INOUE S, AKAGI M, ASADA S, et al. The valgus inclination of the tibial component increases the risk of medial tibial condylar fractures in unicompartmental knee arthroplasty. *J Arthroplasty*. 2016;31(9):2025-2030.
- [93] PE AE, CALVO B, MARTÍNEZ MA, et al. A three-dimensional finite element analysis of the combined behavior of ligaments and menisci in the healthy human knee joint. *J Biomech*. 2006;39(9):1686-1701.
- [94] INNOCENTI B, BILGEN MF, LABEY L, et al. Load sharing and ligament strains in balanced, overstuffed and understuffed uka. a validated finite element analysis. *J Arthroplasty*. 2014;29(7):1491-1498.
- [95] VILLA T, MIGLIAVACCA F, GASTALDI D, et al. Contact stresses and fatigue life in a knee prosthesis: comparison between in vitro measurements and computational simulations. *J Biomech*. 2004;37(1):45-53.
- [96] BISCHOFF JE, HERTZLER JS, MASON JJ. Patellofemoral interactions in walking, stair ascent, and stair descent using a virtual patella model. *J Biomech*. 2009;42(11):1678-1684.
- [97] LIAU JJ, CHENG CK, HUANG CH, et al. The effect of malalignment on stresses in polyethylene component of total knee prostheses—a finite element analysis. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2002;17(2):140-146.
- [98] IESAKA K, TSUMURA H, SONODA H, et al. The effects of tibial component inclination on bone stress after unicompartmental knee arthroplasty. *J Biomech*. 2002;35(7):969-974.
- [99] SAWATARI T, TSUMURA H, IESAKA K, et al. Three-dimensional finite element analysis of unicompartmental knee arthroplasty—the influence of tibial component inclination. *J Orthop Res*. 2005;23(3):549-554.
- [100] SIMPSON DJ, PRICE AJ, GULATI A, et al. Elevated proximal tibial strains following unicompartmental knee replacement—a possible cause of pain. *Med Eng Phys*. 2009;31(7):752-757.
- [101] BRUNI D, IACONO F, RUSSO A, et al. Minimally invasive unicompartmental knee replacement: retrospective clinical and radiographic evaluation of 83 patients. *Knee Surg Sports Traumatol Arthroscopy*. 2010;18(6):710-717.
- [102] KIM KT, LEE S, KIM TW, et al. The influence of postoperative tibiofemoral alignment on the clinical results of unicompartmental knee arthroplasty. *Knee Surg Relat Res*. 2012;24(2):85-90.