

有限元法在髋关节运动力学研究中的应用进展

白波 罗林聪 彭镰侨

摘要 人工关节置换术是治疗多种髋关节疾病的有效方式,置换后的运动生物力学研究日益受到重视。有限元法对复杂物体的运动生物力学分析具有独特优势,在人工髋关节置换术后的运动力学研究中有较多应用。该文回顾该领域文献,对有限元分析法应用于髋关节置换术后运动力学的研究进展作一综述,涉及髋臼及股骨体的应力应变分布、应力遮挡、假体松动、假体的优化设计、假体的初期稳定性以及肌肉力载荷影响等方面。

关键词 有限元分析;运动力学;髋关节置换

DOI: 10.3969/j.issn.1673-7083.2018.01.007

髋关节具有独特的解剖学结构和重要生理功能,髋关节置换术是治疗多种髋关节疾病的有效方式。置换术后,对置换关节进行运动力学研究日益受到重视,但鉴于髋关节复杂的解剖结构,体内外的运动力学研究均非常困难。

有限元分析最初应用于复杂结构的计算,与计算机技术结合后在工程领域得到广泛应用,并很快发展到医学领域。有限元的基本思想为“化整为零,集零为整”。对人体而言,有限元分析的基本步骤大致为:①选定研究对象;②CT 或 MRI 扫描;③三维重建一体网格划分;④材料属性赋值;⑤边界设置;⑥负荷加载;⑦有限元分析等。有限元分析在不规则物体的生物力学研究方面具有独特优势,因而在人工髋关节置换术后的运动力学研究中有较多应用。

1 髋臼假体的运动力学研究

髋臼假体的研究涉及假体的几何形状、厚度、材料、前倾角与外展角、髋臼-股骨头间隙及髋臼-股骨头等方面,尤以前倾角与外展角的研究较多。与静态下加载负荷的研究相比,步行、上下楼梯、坐下、站立以及运动中碰撞等动态研究更符合髋臼的生理情况。

D'Lima 等^[1]研究了不同髋臼假体位置与股骨头、颈的直径比对关节撞击和活动度的影响,结果表

明髋臼外展角 $<45^\circ$ 将影响髋关节的屈曲和外展, $45^\circ\sim 55^\circ$ 配合适当的髋臼-柄前倾角可使髋关节获得比较理想的活动度及稳定性。斯海波等^[2]采用有限元模型研究患者活动状态及不同假体位置对人工关节撞击、脱位的影响,结果表明当从坐位到站立及站立到弯腰时容易发生脱位,且在髋臼前倾角较小时更易发生脱位。

有限元法除可分析髋关节外部受力情况外,也可用于内部受力分析,这对预测髋臼骨折部位及髋臼侧的初期稳定性和松动有重要作用。Kunze 等^[3]运用三维有限元模型研究人分别从 46、53、60 cm 高度的座椅站起时,坐位高度对髋臼假体稳定性的影响,发现骨-髋臼杯界面所承受的最大作用力均发生于起立动作开始时,分别为 3 760、1 590、1 400 N。聂涌等^[4]用有限元法分析正常步态周期中髋臼周围区域的应力分布,结果表明从髋臼外面观,应力最大值在坐骨大切迹附近,从髋臼上、中、下剖面观,应力分布在髋臼后上方的骨松质与骨皮质交界处,而在髋臼的前柱与后柱,骨皮质是应力主要分布部位。但是,该研究未考虑相关的肌肉和韧带的影响。Tanner 等^[5]使用有限元法分析全髋关节置换术中保留或去除软骨下骨板对髋臼杯的影响,结果表明在步态载荷下的髋关节力及 22 块肌肉力作用下,去除软骨下骨板导致髋臼杯松质骨应力减小,皮质骨应力轻度增加。

Wang 等^[6]进行了长期生理负荷条件下髋臼置换损伤演化的有限元分析,结果表明骨水泥界面剥落最初发生于髋臼圆顶的后上象限。Shankar 等^[7]提出一种三维有限元建模方法,用于评估在髋臼杯外展角度作用下股骨头与髋臼杯之间磨损演变的情况。该方法中股骨头与髋臼杯使用 3 种材料:聚晶

基金项目:广东省科技厅 2014 年公益研究与能力建设专项资金项目(2014A020215035)、广东省教育厅高校科技计划项目(08A021)、2013 年度广东省教育厅高等学校第五批教学改革项目(1201420813)、中国研究生教育学会项目(B3-20170306-03)

作者单位:510120, 广州医科大学附属第一医院骨科、广东省矫形植入骨科重点实验室、广州骨科研究所

通信作者:彭镰侨 E-mail: 18922346634@163.com

金刚石(PCD)、氧化铝和氮化硅。在正常步态和旋转运动的加载作用下计算接触压力和滑动距离,以预测磨损变化。研究发现,采用PCD材料时股骨头与髌臼杯之间磨损最少;无论何种材料,当外展角度自 35° 增加至 70° ,体积磨损均有减少趋势,但髌臼杯角度越大则边缘接触越多,磨损也越多。该研究认为,要保证髋关节置换较长的生存期,应避免过大的外展角,以降低磨损,髌臼后上部应被完全重建。Korhonen等^[8]的研究对骨水泥聚乙烯髌臼杯进行有限元模拟,并测试其几何形态与外展角应力的影响,结果表明髌臼杯的不同几何形态、外展角度与厚度以及髌臼杯与股骨头之间的间隙变化,均会影响应力分布及髋关节置换后的长期稳定性。

2 股骨假体的动态力学研究

股骨假体在髋关节置换中占据重要地位。以前的研究多集中于静态作用力方面,目前则以动态的运动力学研究为主,涉及股骨头大小、前倾角及移位、股骨颈、股骨柄(形状、长短、材料)、股骨柄与骨髓腔的微移动以及界面空泡等。

2.1 股骨应力应变分析

Lavernia等^[9]采用有限元法模拟步行时单腿站立阶段负荷作用下股骨头直径的变化,发现股骨头直径自28 mm增大至40 mm时,股骨头-颈交界区域应力显著升高,最大主应力增加2倍,且与股骨头材料无关,表明股骨的应力水平与股骨头直径相关。Bai等^[10]采用三维有限元骨骼肌肉模型分析正常步态下股骨的应力应变分布、主应力线分布及股骨微移动分布的力学特征,结果表明在整个步态过程中,最大位移在股骨头,最大应力在股骨中远端,股骨颈及股骨体中下段存在较大的拉应力。方国芳等^[11]采用三维有限元法研究不同运动状态下股骨的应力分布,发现直立行走时应力集中于股骨中段,跪立位时股骨下段应力明显增加且集中于股骨髁间,向后摔倒位时,应力集中于股骨颈处,表明不同运动状态下股骨应力集中位置不同。韩树洋^[12]用有限元法分析步行时髋关节的运动,发现正常股骨的高应力区域集中于股骨内侧(压应力)和外侧(拉应力),中间髓腔部位的应力较小;植入假体后应力大小及分布均有较大改变,应力集中于假体柄部,其峰值为正常股骨模型的4.36倍。徐灵军等^[13]采用三维有限元法对不同形状骨水泥假体进行研究,发现在静态和步行两种状态下股骨应力分布存在差异。

2.2 股骨假体设计分析

假体设计应考虑各种因素的影响,尽量降低对股骨正常应力的破坏,使其更符合生理要求。Shi等^[14]用有限元法分析髋关节骨水泥干在步行和上楼梯时植入位置和骨水泥厚度对股骨正常应力的影响,发现植入位置比骨水泥厚度影响更大,在股骨干近端,内旋转是主要影响因素;在远端,股骨干移动是主要影响因素。Stolk等^[15]研究全髋关节置换4种骨水泥假体在正常行走和爬楼梯时的力学损伤,结果表明机械损伤与股骨干迁移量无关,但与股骨干的设计特点相关。Gabarre等^[16]建立了聚碳酸酯-聚氨酯和聚碳酸酯-金属2种接触材料的髋关节有限元模型,研究不同步态下假体对髋关节的影响,结果表明聚碳酸酯-聚氨酯接头与关节软骨相似,其接触面积适中,接触压力小,更适合在全髋关节置换术中的应用。Moulgada等^[17]采用有限元法在静态和动态载荷作用下分析Cera-ver-Osteal髋关节假体不同组成部分的应力分布,结果显示,与常用的Charnley模型相比,该假体在骨水泥膜上剪切应力更弱,且寿命更长。Reimeringer等^[18]采用有限元法研究全髋关节置换后快速行走和爬楼梯活动,发现适当缩短假体的股骨柄长度对髋关节的初始稳定性与长期生存率无影响。

2.3 股骨假体的应力遮挡与初期稳定性分析

根据Wolff定律,假体植入后股骨的正常应力分布发生改变,发生应力遮挡且有假体的初期稳定性变化。Reimeringer等^[19]运用有限元法研究全髋关节置换(非骨水泥假体)术后上楼梯时假体接触率对最初稳定位置的影响,结果发现骨水泥干与骨充分接触(100%)并不能保证良好的初期稳定性,股骨干的初期稳定性受接触率和其位置的影响,接触率低于40%时,为保证良好的初期稳定性,股骨干应与皮质骨接触。唐刚等^[20]在探讨髋关节置换术前后慢走及上下楼梯时股骨的生物力学性状时发现,2种状态下应力均集中于股骨近端内侧,主要在骨小梁,上下楼梯比慢走时髋关节承受负荷更大,应力遮挡也更为明显。Boyle等^[21]在全髋关节置换术前后进行了微观层面有限元模拟骨重建研究,以步行和爬楼梯运动为载荷,进行骨小梁结构模拟计算,发现股骨近端区域应力遮挡率最高,术后骨重建保持不变,而股骨中远端部分压力增加较大,表明载荷有向远端转移的现象。

2.4 股骨假体微移动与界面孔隙率的分析

股骨干呈明显向前的弓形,且股骨髓腔截面非单一椭圆形或圆形,因而假体与髓腔间存在微移动及界面孔隙率的影响,其间良好的匹配程度决定应力传导质量及稳定性,并可减少远期松动发生率。Amirouche等^[22]用有限元法分析步态下骨骼-肌肉模型的股骨偏移对骨植入物微移动的影响,发现股骨偏移增加10 mm,外展肌产生的应力峰值在1个步态周期内将增加15%;股骨偏移减少10 mm,骨远端的 von Mises 应力分布增加77.5%;正常生理情况下股骨偏移在10 mm之内,骨植入物微移动和应力峰值无改变。Mann等^[23]结合实验室模型和有限元模型模拟上下楼梯时股骨干-骨水泥界面孔隙率对股骨干迁移的影响,发现2种模型均显示界面孔隙率与股骨干内旋转有很强的正相关,界面孔隙率>30%会导致股骨干内旋转增大,低于此水平股骨干松动风险可降至最低。Sofuoglu等^[24]采用有限元法对髋关节置换的机械性松动进行研究,分析不同状态(步行或爬楼)不同类型骨水泥假体不同负荷(集中负荷或分散负荷)下的影响,发现最大 von Mises 应力和应变发生在皮质骨和骨小梁骨层,全髋关节置换的机械性松动受以上因素的共同影响。

2.5 股骨肌肉力载荷的影响

髋关节周围的肌肉、韧带等软组织对维持髋关节稳定非常重要。Taylor等^[25]指出,在完整股骨的应力和应变分布中,有无肌肉力载荷,股骨内侧压应力和外侧拉应力有显著差别。仲照明等^[26]用有限元法分析髋关节力和肌肉力对股骨的影响,发现臀中肌肌肉力对股骨内应力分布影响最大,其余肌肉力影响较小。Blumenfeld等^[27]研究体内髋关节假体在多种活动姿势和体位下的活动状态表明,只有在多种状态下的综合考虑,才能够较好地分析全髋关节置换术后的假体完整受力。

3 结语

髋关节的运动力学研究比静态力学研究更符合生理要求,随着有限元法的快速发展和计算机技术的更加完善,建模方法将更加多样化,临床应用也将更广泛。目前,髋关节有限元模型模拟的研究尚有一些不足之处:第一,大多数模型只包括下肢的主要肌肉,且模型中的肌肉基本用直线代替连接,一些绕过关节的肌肉与真实情况存在一定差异;第二,髋关节周围还有许多坚韧的韧带附着,其具有不同于肌肉的复杂生理特性,而大多数作者在分析时未将其

考虑在内;第三,在有限元运动力学分析中仅对一些活动的几个重要阶段进行了分析,并未进行更细化的分析研究。今后需要开展更多的相关研究,以更好地指导临床应用。

参考文献

- [1] D'Lima DD, Urquhart AG, Buehler KO, et al. The effect of the orientation of the acetabular and femoral components on the range of motion of the hip at different head-neck ratios [J]. J Bone Joint Surg Am, 2000, 82(3): 315-321.
- [2] 斯海波, 曾羿, 兰平文, 等. 有限元分析应用于全髋关节置换中的研究进展[J]. 中国矫形外科杂志, 2014, 22(24): 2256-2260.
- [3] Kunze M, Schaller A, Steinke H, et al. Combined multi-body and finite element investigation of the effect of the seat height on acetabular implant stability during the activity of getting up[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2012, 105(2): 175-182.
- [4] 聂涌, 马俊, 康鹏德, 等. 正常步态周期中髋臼周围区域的应力分布及其在 THA 髋臼重建中的指导[J]. 医用生物力学, 2014, 29(1): 31-37.
- [5] Tanner KE, Svensson I, Samuelsson F, et al. Finite element study of the acetabulum in cemented hip arthroplasty investigating retention or removal of the subchondral bone plate[J]. Biomed Tech (Berl), 2016, 61(5): 525-536.
- [6] Wang JY, Heaton-Adegbile P, New A, et al. Damage evolution in acetabular replacements under long-term physiological loading conditions [J]. J Biomech, 2009, 42(8): 1061-1068.
- [7] Shankar S, Gowthaman K, Uddin MS. Predicting long-term wear performance of hard-on-hard bearing couples: effect of cup orientation[J]. Med Biol Eng Comput, 2016, 54(10): 1541-1552.
- [8] Korhonen RK, Koistinen A, Kontinen YT, et al. The effect of geometry and abduction angle on the stresses in cemented UHMWPE acetabular cups—finite element simulations and experimental tests[J]. Biomed Eng Online, 2005, 4: 32.
- [9] Lavernia CJ, Iacobelli DA, Villa JM, et al. Trunnion-Head stresses in THA: are big heads trouble?[J]. J Arthroplasty, 2015, 30(6): 1085-1088.
- [10] Bai XL, Shang P, Wang CT. Distribution features of stress-strain, principle stress vectors and displacements of normal femur during gait[J]. J Clinical Rehabilitative Tissue Eng Res, 2010, 14(52): 9873-9876.
- [11] 方国芳, 林荔军, 于博, 等. 不同状态下股骨的应力分布及临床应用[J]. 中国组织工程研究, 2012, 16(17): 3045-3047.
- [12] 韩树洋. 人体关节生物力学实验及仿真研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [13] 徐灵军, 朱海波, 张银网, 等. 人工髋关节活体有限元建模

- 及力学分析[J]. 中国组织工程研究, 2012, 16(26): 4770-4775.
- [14] Shi J, Browne M, Strickland M, et al. Sensitivity analysis of a cemented hip stem to implant position and cement mantle thickness [J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2014, 17(15): 1671-1684.
- [15] Stolk J, Janssen D, Huiskes R, et al. Finite element-based preclinical testing of cemented total hip implants[J]. Clin Orthop Relat Res, 2007, 456: 138-147.
- [16] Gabarre S, Herrera A, Mateo J, et al. Study of the polycarbonate-urethane/metal contact in different positions during gait cycle[J]. Biomed Res Int, 2014, 2014: 548968.
- [17] Moulgada A, Bouziane MM, Bouiadjra BB, et al. Finite element simulation of stress distribution in the different components of Ceraver-Osteal hip prosthesis: static and dynamic analysis[J]. Mechanika, 2014, 20(5): 452-459.
- [18] Reimeringer M, Nuño N, Desmarais-Trépanier C, et al. The influence of uncemented femoral stem length and design on its primary stability: a finite element analysis [J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2013, 16(11): 1221-1231.
- [19] Reimeringer M, Nuño N. The influence of contact ratio and its location on the primary stability of cementless total hip arthroplasty: a finite element analysis[J]. J Biomech, 2016, 49(7): 1064-1070.
- [20] 唐刚, 王建革, 罗红霞. 髋关节置换前后不同步态下股骨应力分布[J]. 医用生物力学, 2015, 30(2): 143-147.
- [21] Boyle C, Kim IY. Comparison of different hip prosthesis shapes considering micro-level bone remodeling and stress-shielding criteria using three-dimensional design space topology optimization[J]. J Biomech, 2011, 44(9): 1722-1728.
- [22] Amirouche F, Solitro G, Walia A. No effect of femoral offset on bone implant micromotion in an experimental model[J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2016, 102(3): 379-385.
- [23] Mann KA, Damron LA, Miller MA, et al. Stem-cement porosity may explain early loosening of cemented femoral hip components: experimental-computational in vitro study[J]. J Orthop Res, 2007, 25(3): 340-350.
- [24] Sofuoglu H, Cetin ME. An investigation on mechanical failure of hip joint using finite element method[J]. Biomed Tech (Berl), 2015, 60(6): 603-616.
- [25] Taylor ME, Tanner KE, Freeman M, et al. Stress and strain distribution within the intact femur: compression or bending? [J]. Med Eng Phys, 1997, 19(1): 97-99.
- [26] 仲照明, 宫赫, 肖智韬, 等. 髋臼力和肌肉力对股骨有限元分析结果的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(S1): 303-308.
- [27] Blumenfeld TJ, Glaser DA, Bargar WL, et al. In vivo assessment of total hip femoral head separation from the acetabular cup during 4 common daily activities [J]. Orthopedics, 2011, 34(6): 127.

(收稿:2017-07-13;修回:2017-11-06)

(本文编辑:杨晓娟)

• 敬告读者 •

为了更好地服务读者和作者,提高稿件的处理速度和效率,缩短文章发表周期,我刊现已采用远程采编系统。进入官方网站(<http://gjgkx.paperopen.com>),点击左上侧“作者投稿”栏,登记作者信息,注册成功后即可在线投稿。或可直接将稿件以附件形式发送至官方邮箱(intjorthop@163.com)。请作者以实名、常用电子邮箱和移动电话登记,以便于后续与您联系。

《国际骨科学杂志》编辑部