

文章编号:1004-7220(2017)02-0109-06

上楼梯对人工膝关节假体磨损影响的有限元研究

王川^{1,2}, 赵峰^{1*}, 丁文宇¹, 孙艳^{1,2}, 樊瑜波¹

(1. 北京航空航天大学 生物与医学工程学院, 生物力学与力生物学教育部重点实验室, 北京 100191;

2. 中国科学院 传感器技术国家实验室, 北京 100190)

摘要: **目的** 通过有限元磨损模型研究上楼梯对衬垫磨损的影响,对完善人工膝关节的磨损评估方法、指导假体设计等具有重要的理论和实际意义。**方法** 基于 Archard 磨损理论建立人工膝关节衬垫磨损的有限元模型并验证,然后加载正常水平行走(ISO14243 标准)和上楼梯的载荷,对比分析上楼梯对衬垫磨损的影响。**结果** 水平行走步态载荷下,模型预测的磨损结果与文献实验报道结果一致,模型具有较好的有效性。上楼梯的体积磨损率为每 100 万次循环(million cycle, MC)37.10 mm³,显著高于水平行走步态的体积磨损率(16.94 mm³/MC),线性磨损也具有类似的结果。上楼梯内侧平台的磨损区域主要集中在后部,与水平行走时内侧平台的磨损主要发生在中部区域有明显不同。**结论** 上楼梯作为高载荷、高屈膝角度的日常运动之一,对人工膝关节衬垫的磨损有较大影响,其磨损率和磨损区域与水平行走有明显差异,在人工膝关节的磨损检测和评估中应该给予适当的重视。

关键词: 全膝关节置换术; 上楼梯; 磨损; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2017.02.002

Finite element study on total knee prosthesis wear during stair ascent

WANG Chuan^{1,2}, ZHAO Feng^{1*}, DING Wen-yu¹, SUN Yan^{1,2}, FAN Yu-bo¹ (1. Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of the Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. State Key Laboratory of Transducer Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Objective To study the effect of stair ascent on insert wear of total knee replacement (TKR) by finite element model, which is of great theoretical and practical significance for improvement of wear evaluation method and guidance of artificial knee joint prosthesis design. **Methods** A finite element model of TKR wear based on Archard's law was established and validated. The model was applied with loads under normal level walking (ISO14243) and stair ascent, respectively, to compare and analyze the influence of stair ascent on TKR wear. **Results** The predicted wear during level walking was consistent with experimental results reported in the literature. The volumetric wear rate during stair ascent was 37.10 mm³ per million cycle (MC), which was significantly higher than that during level walking (16.94 mm³/MC). The linear wear during stair ascent was significantly higher than that during level walking as well. Wear during stair ascent was mainly distributed in the backward area of the medial platform, which was obviously different from that during level walking. **Conclusions** As a common daily activity with high loads and high flexion angles, stair ascent has a significant effect on TKR wear, and more attention should be paid to the testing and evaluation of TKR wear.

Key words: Total knee replacement (TKR); Stair ascent; Wear; Finite element analysis

收稿日期:2016-04-07; 修回日期:2016-05-09

基金项目:国家自然科学基金项目(11072021,31200725,31470942),国家科技支撑计划(2012BAI22B02),传感器技术国家重点实验室开放基金(NSFC31470942)。

通信作者:樊瑜波,教授,博士研究生导师,Tel:(010)82339428;E-mail:yubofan@buaa.edu.cn。

* 为共同第一作者

全膝关节置换术(total knee replacement, TKR)是治疗晚期膝关节炎常见的外科手术^[1]。而假体的超高分子量聚乙烯(ultra-high molecular weight polyethylene, UHMWPE)衬垫磨损会引起骨质溶解和无菌性松动,进而导致假体的远期失效,是限制假体寿命的主要原因之一^[2]。目前,采用多自由度膝关节磨损试验机的人工膝关节磨损实验及其磨损体积和深度的测量是公认、有效、必需的磨损评估方法^[3]。但是,磨损实验的时间和成本花费很高,使得对假体设计进行全面的参量化研究十分困难^[4]。为此,有限元磨损计算模型逐渐得到关注,成为磨损试验的一种有效补充方法^[4-8]。

1996年,Maxian等^[9]建立一个基于Archard磨损理论的有限元模型,首次预测了全髌关节置换中UHMWPE衬垫的磨损。随后,有限元模拟方法逐渐运用到人工膝关节衬垫的磨损预测中。已有文献研究了交叉剪切磨损、应变硬化、蠕变^[5]等因素对磨损的影响,并对Archard磨损算法进行改进^[7-8]。

然而,目前的数值计算研究主要模拟人工膝关节在正常水平行走步态(ISO 14243标准采用的载荷)下的磨损,而鲜有考虑其他日常运动载荷下(如上、下楼等)人工膝关节的磨损。近年来,有关真实日常运动载荷对人工膝关节磨损影响的研究越来越受到关注。Benson等^[10]将水平行走步态载荷与下楼楼梯载荷以70:1的比例混合加载到人工膝关节磨损试验机上,进行共计500万次循环(million cycles, MC)磨损试验,并与只加载水平行走步态载荷的磨损实验进行对比;结果发现,水平行走步态与下楼楼梯载荷混合加载的试验组与只加载步态载荷的对照组相比,磨损率增加了5倍。Jaber等^[11]分别进行了

2 MC水平行走步态和上楼梯载荷的人工膝关节磨损试验,结果表明,上楼梯实验组的体积磨损率 $[(22 \pm 3) \text{ mm}^3/\text{MC}]$ 是水平行走步态对照组 $[(10.68 \pm 0.5) \text{ mm}^3/\text{MC}]$ 的2倍。为模拟人工膝关节在日常运动中的磨损,Popoola等^[12]采用了一个更全面的日常运动测试方案进行磨损试验,包括水平行走步态(89.2%)、坐起(4.5%)、上楼梯(5.4%)和深蹲(0.9%),结果发现,综合日常运动下衬垫磨损率 $[(19.9 \pm 4.9) \text{ mm}^3/\text{MC}]$ 显著高于水平行走步态磨损率 $[(14.9 \pm 3.2) \text{ mm}^3/\text{MC}]$ 。

上楼梯及其类似的上坡、爬山等运动是常见的高载荷、高屈膝角度的日常运动,会引起人工膝关节更多的磨损,但是目前研究还很不充分,有关上楼梯对磨损的具体影响尚不明确。为此,本文建立了一个人工膝关节衬垫磨损预测的有限元模型,在ISO标准步态载荷下进行有效性验证后,对上楼梯的载荷及运动曲线进行加载,得到上楼梯情形下的衬垫磨损,并与水平行走步态下的衬垫磨损进行对比分析。

1 材料与方法

1.1 运动和载荷数据

水平行走步态和上楼梯的加载都采取位移控制方式。如图1所示,水平行走的运动与载荷数据采用ISO 14243-3标准,包含屈膝角度、内旋-外转角度、前后位移和轴向力^[13]。上楼梯的屈膝角度和内旋-外转角度选取自文献^[14],前后位移选取自文献^[15-16],轴向力选取自文献^[17]。所有的运动和载荷数据曲线被等分成100个数据点进行加载,胫骨相对股骨向前移动和内转为正。

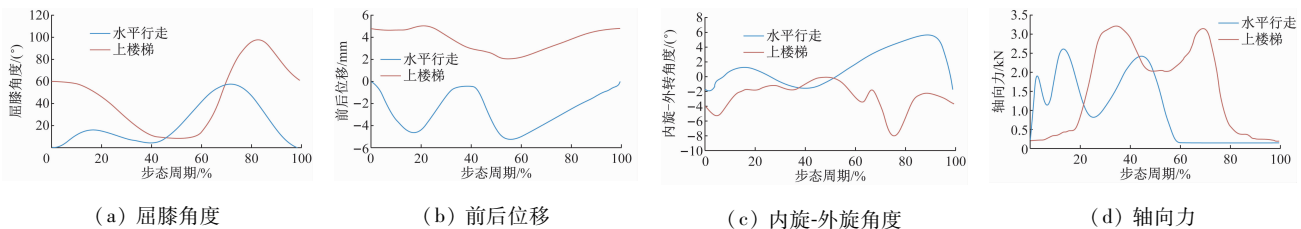


图1 水平行走和上楼梯的运动与载荷数据

Fig. 1 Kinematics and load data of level walking and stair ascent (a) Flexion, (b) Anterior-posterior (AP) translation, (c) Internal-external (IE) rotation, (d) Axial force

1.2 有限元模型

如图 2 所示,针对左膝人工关节假体(NexGen-RR LPS-Flex Fixed Bearing Knee, Zimmer Inc.)进行三维几何重建,几何模型包含胫骨衬垫和股骨髁两个部分,在 ABAQUS/Standard 6.11 中建立有限元模型。胫骨衬垫网格主要区域用 8 节点六面体单元(C3D8R)划分,约占总体积的 95%,部分角落和 Cam 区域用四面体单元(C3D10M)划分。股骨髁简化为刚体,与参考点设置了刚体耦合,网格用四边形单元(S4)划分。衬垫材料属性设置为线弹性,弹性模量为 463 MPa,泊松比为 0.46^[4]。股骨髁和衬垫接触面设置罚函数接触,库伦摩擦系数为 0.07^[4]。

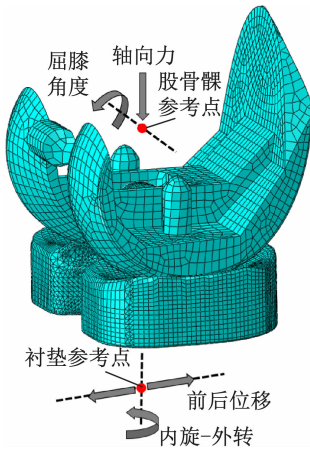


图 2 人工膝关节有限元模型及位移控制条件
 Fig. 2 Finite element model of TKR and displacement control conditions

屈膝角度和轴向力通过参考点施加到股骨髁上,股骨髁参考点在其屈膝转轴上,并且根据 ISO 14243-3 向内侧偏移 5 mm。股骨髁剩下的 4 个自由度被完全约束。内旋-外转角度和前后位移通过参考点施加到衬垫上,衬垫参考点在上下方向和股骨髁参考点对齐。衬垫参考点的屈膝、内外移动、外翻内翻 3 个自由度被完全约束,衬垫下表面在上下方向上被约束。

1.3 计算磨损预测

UHMWPE 衬垫关节面的线性磨损根据 Archard 磨损理论进行计算,其简化表达式为^[18]:

$$H = KpS$$

其中: H 为线性磨损,即磨损深度,单位 mm; p 为接

触压力,单位 MPa; S 为相对摩擦距离,单位 mm; K 为磨损因子,是一个经验常数, $K = 2.64 \times 10^{-7} [\text{mm}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}]$ ^[4]。

采用自适应网格技术模拟磨损过程,基于 FORTRAN 语言编写了用户子程序 UMESHMOTION,流程图如图 3 所示。首先,对水平行走步态或上楼梯进行有限元计算,并在每个增量步提取衬垫表面节点的编号、接触压力和摩擦距离等数据。然后根据 Archard 磨损公式计算每个表面节点的线性磨损。Knight 等^[4]研究了不同迭代间隔对磨损结果收敛性的影响,认为 0.5 MC 是较合理的迭代间隔。本文也进行验证,结果发现,迭代间隔为 0.5、0.25、0.125 MC 的磨损结果虽有不同,但差异小于 5%。在综合考虑计算精度和时间成本的基础上,选择 0.5 MC 作为迭代间隔。在第 1 个迭代结束时,根据计算的线性磨损,沿法线方向移动每一个衬垫表面节点,即完成了第 1 个 0.5 MC 的磨损模拟。然后进入下一个迭代,直到完成 10 次迭代共计 5 MC 的磨损模拟。

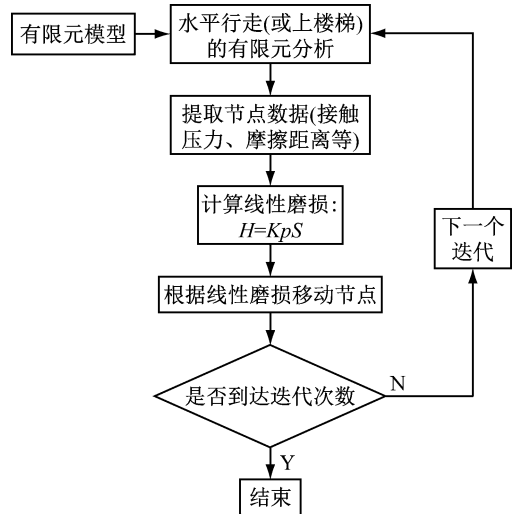


图 3 子程序 UMESHMOTION 流程图
 Fig. 3 Flowchart of user defined subroutine UMESHMOTION

2 结果

2.1 模型验证

为了验证磨损模型的有效性,对 5 MC 水平行走步态下的体积磨损和最大线性磨损进行预测,并与磨损实验数据进行对比。如图 4 所示,模型预测

的体积磨损率为 $16.94 \text{ mm}^3/\text{MC}$, 与文献[19-21]中报道的实验磨损结果相当。其体积磨损随着循环次数的增加呈线性增长趋势, 并与 Knight 等^[4]的实验及有限元结果一致。

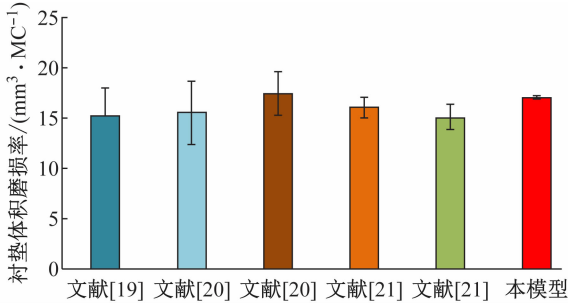
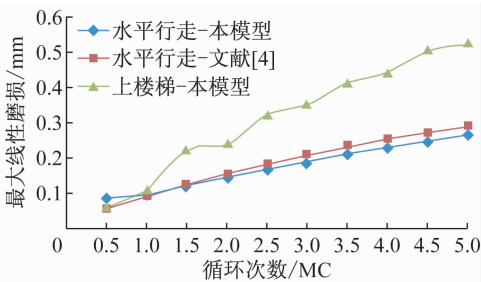


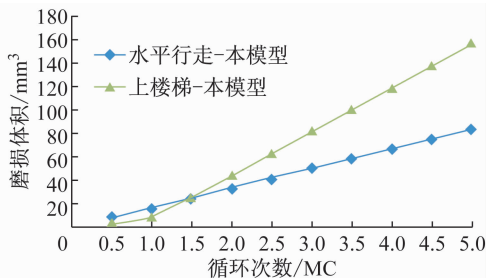
图4 模型预测的 ISO 14243 标准水平行走步态下的体积磨损率与文献报道实验结果的对比

Fig. 4 Comparison between predicted volumetric wear rate and reported experimental results for gait of ISO 14243

模型预测的水平行走步态最大线性磨损率为 $0.053 \text{ mm}/\text{MC}$, 发生在内侧平台。图 5(a)所示为本模型预测的最大线性磨损与 Knight 等^[4]的模拟结果对比, 在数值和趋势上都有较好的一致性, 进一步验证了所建磨损模型的有效性。



(a) 最大线性磨损



(b) 体积磨损量

图5 水平行走步态和上楼梯的磨损结果对比
Fig. 5 Comparison of wear between level walking and stair ascent

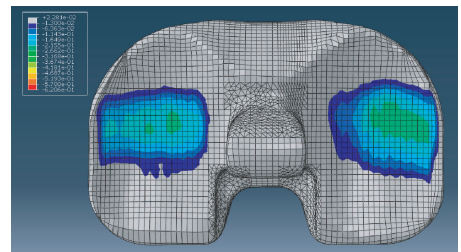
(a) Maximum linear wear, (b) Volumetric wear

2.2 水平行走步态和上楼梯的磨损对比

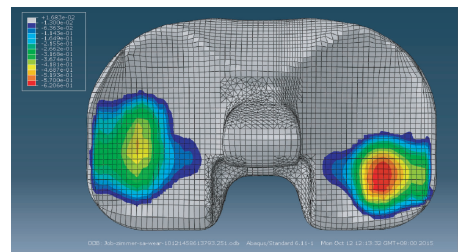
模型经过验证后, 对上楼梯的磨损进行模拟计算和预测[见图 5(b)]。在 $0 \sim 1 \text{ MC}$, 上楼梯的体积磨损增长较缓慢, 其后磨损增长较快; 在 $1 \sim 5 \text{ MC}$, 上楼梯的体积磨损率为 $37.10 \text{ mm}^3/\text{MC}$, 是水平行走步态磨损率($16.94 \text{ mm}^3/\text{MC}$)的 2.19 倍。

图 5(a)也显示了水平行走步态和上楼梯最大线性磨损随循环次数的变化趋势。上楼梯的最大线性磨损均显著大于水平行走步态。5 MC 后, 水平行走步态的最大线性磨损为 0.265 mm , 上楼梯的最大线性磨损为 0.522 mm , 是水平行走步态下的 1.97 倍。

5 MC 后, 水平行走步态时的磨损部位在内侧和前后方向大致发生在胫骨平台的中间部位, 内侧的磨损量大于外侧。而上楼梯时在前后方向上内外侧的磨损位置均有向后移, 而内侧后移明显, 磨损在内侧主要发生在后部, 区域较为集中; 内侧的磨损量明显大于外侧; 磨损的分布无论从前后还是从内外方向看, 都较水平行走时的磨损分布更加不对称(见图 6)。



(a) 水平行走步态



(b) 上楼梯

图6 500万次循环后的磨损深度分布图
Fig. 6 Wear depth contours after 5 million cycles

(a) Level walking, (b) Stair ascent

3 讨论

目前大多数的人工膝关节磨损实验研究都是采

用ISO 14243的步态载荷,而忽略了其他日常运动。近年来,高屈曲日常运动对人工膝关节生物力学及磨损的影响逐渐引起研究者的关注^[22]。上楼梯作为常见的高载荷、高屈膝角度的日常运动,研究其对人工膝关节磨损的影响,可为人工膝关节磨损进一步全面的参量化研究提供参考。

本研究通过有限元磨损模型模拟了人工膝关节在上楼梯载荷下的磨损。在0~1 MC,上楼梯的磨损增长较缓慢;1~5 MC,磨损增长较快,体积磨损率为 $37.10 \text{ mm}^3/\text{MC}$,显著高于水平行走步态的体积磨损率($16.94 \text{ mm}^3/\text{MC}$)。分析上楼梯前两次迭代后(0~1 MC)的磨损云图发现,在内、外侧平台均出现了多个不连续的磨损区域,表明前期股骨髁和衬垫的接触并不良好,可能是导致前期磨损增长缓慢的原因。因此,选择1~5 MC的数据计算平均磨损率。Jaber等^[11]的磨损实验发现,上楼梯和水平行走步态的体积磨损率分别为(22 ± 3)和(10.68 ± 0.5) mm^3/MC ,均小于本文结果。这可能是因为Jaber等^[11]采用的是活动衬垫型人工膝关节,故测量的水平行走步态的体积磨损率小于一般固定衬垫型膝假体的磨损率。尽管如此,本文和Jaber等^[11]均发现,上楼梯将导致2倍于水平行走步态的TKR体积磨损。除了磨损量(体积磨损、线性磨损或相应的质量磨损)有显著的差异外,上楼梯运动载荷下TKR衬垫的磨损分布与水平行走情形有很大差异,提示上楼梯的磨损应该引起更足够的重视和深入的研究。

本文的工作还存在如下的一些局限性:

(1) Archard磨损理论是一个线性的磨损预测算法,其磨损因子为常数,这可能会限制其在复杂问题(如应变硬化、交叉磨损等)中的应用。另外,目前报道的磨损预测算法均是黏着磨损模型,难以模拟实验或取回衬垫中观察到的分层、点蚀、剥离和断裂等其他磨损形式^[7]。

(2) 模型中用于加载的运动和载荷数据来自于多个文献,但这些数据还是具有较好的一致性。本文水平行走步态的磨损结果与其他文献的报道结果^[11,19,21]相比也具有较好的一致性。

(3) 衬垫的材料属性为弹性,并未考虑其非线性性和蠕变的影响。且使用的材料属性与大多数有限元研究一样针对传统UHMWPE,未考虑高交联

UHMWPE,而后者被认为能减少人工膝关节磨损,并被广泛使用。

(4) 未开展磨损实验,对模型预测结果进行直接验证,这将是本课题组的下一步工作之一。

4 结语

TKR是常见的治疗晚期膝骨关节炎的外科手术,能减轻膝关节疼痛,重建膝关节功能。但UHMWPE衬垫的磨损限制了其远期存活率,因此,对于衬垫磨损的评估十分必要。目前,大多数的磨损评估只模拟了ISO标准的水平行走步态载荷,而忽略了其他日常运动。本文基于Archard磨损理论建立了一个人工膝关节磨损有限元模型,并在ISO标准步态载荷下验证了模型的有效性,随后对人工膝关节在上楼梯载荷下的磨损进行预测。通过对比水平行走步态和上楼梯载荷下衬垫的磨损发现,上楼梯的磨损与水平行走步态下的磨损在磨损量和磨损分布上都有很大差异。上楼梯对TKR术后的假体衬垫磨损具有重要影响,应该在以后的人工膝关节磨损测量和评测中予以足够的重视。本模型和方法可以用于假体设计和临床中人工膝关节衬垫的磨损评估。

参考文献:

- [1] 马青川,肖丽英,李志昌,等. 单侧全膝关节置换术后两下肢受力不对称性的影响因素[J]. 医用生物力学, 2015, 30(1): 89-93.
MA QC, XIAO LY, LI ZC, et al. Factors affecting asymmetrical lower extremity loading after unilateral total knee arthroplasty [J]. J Med Biomech, 2015, 30(1): 89-93.
- [2] 陈瑛贤,王玲,李涤尘,等. 全膝关节置换个体化患者右转步态的骨肌多体动力学仿真[J]. 医用生物力学, 2015, 30(5): 397-403.
CHEN ZX, WANG L, LI DC, et al. Musculoskeletal multi-body dynamic simulation on patient-specific total knee replacement during right-turn gait [J]. J Med Biomech, 2015, 30(5): 397-403.
- [3] 赵峰,王川,樊瑜波. 全膝关节置换术中聚乙烯衬垫的磨损测评研究进展[J]. 中国医疗器械杂志, 2015, 39(1): 39-42.
- [4] KNIGHT LA, PAL S, COLEMAN JC, et al. Comparison of long-term numerical and experimental total knee replacement wear during simulated gait loading [J]. J Biomech, 2007, 40(7): 1550-1558.
- [5] ABDELGAIED A, LIU F, BROCKETT C, et al. Computa-

- tional wear prediction of artificial knee joints based on a new wear law and formulation [J]. *J Biomech*, 2011, 44(6): 1108-1116.
- [6] WILLING R, KIM IY. A holistic numerical model to predict strain hardening and damage of UHMWPE under multiple total knee replacement kinematics and experimental validation [J]. *J Biomech*, 2009, 42(15): 2520-2527.
- [7] STRICKLAND MA, DRESSLER MR, TAYLOR M. Predicting implant UHMWPE wear in-silico: A robust, adaptable computational-numerical framework for future theoretical models [J]. *Wear*, 2012, 274-275: 100-108.
- [8] O'BRIEN S, LUO Y, WU C, *et al*. Computational development of a polyethylene wear model for the articular and backside surfaces in modular total knee replacements [J]. *Tribol Int*, 2013, 59: 284-291.
- [9] MAXIAN TA, BROWN TD, PEDERSEN DR, *et al*. The Frank Stinchfield Award. 3-dimensional sliding/contact computational simulation of total hip wear [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1996, 333: 41-50.
- [10] BENSON LC, DESJARDINS JD, HARMAN MK, *et al*. Effect of stair descent loading on ultra-high molecular weight polyethylene wear in a force-controlled knee simulator [J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2002, 216(6): 409-418.
- [11] JABER SA, TADDEI P, TOZZI S, *et al*. *In vitro* effects on mobile polyethylene insert under highly demanding daily activities: Stair climbing [J]. *Int Orthop*, 2015, 39(7): 1433-1440.
- [12] POPOOLA OO, YAO JQ, JOHNSON TS, *et al*. Wear, delamination, and fatigue resistance of melt-annealed highly crosslinked UHMWPE cruciate-retaining knee inserts under activities of daily living [J]. *J Orthop Res*, 2010, 28(9): 1120-1126.
- [13] International Organization for Standardization. ISO 14234-3 Implants for surgery; Wear of total knee-joint prostheses. Part 1: Loading and displacement parameters for wear-testing machines with displacement control and corresponding environmental conditions for test [S]. 2009.
- [14] GAO B, CORDOVA ML, ZHENG N. Three-dimensional joint kinematics of ACL-deficient and ACL-reconstructed knees during stair ascent and descent [J]. *Hum Mov Sci*, 2012, 31(1): 222-235.
- [15] SILVIA F, MARIA GRAZIA B, ALBERTO L, *et al*. Fluoroscopic and gait analysis of the functional performance in stair ascent of two total knee replacement designs [J]. *Gait Posture*, 2003, 17(3): 225-34.
- [16] NORIMASA S, TETSUYA T, TAKAHARU Y, *et al*. Posterior sliding of the femur during stair ascending and descending in a high-flex posterior stabilized total knee arthroplasty [J]. *J Arthroplasty*, 2013, 28(10): 1707-1711.
- [17] BERGMANN G, BENDER A, GRAICHEN F, *et al*. Standardized loads acting in knee implants [J]. *PLoS One*, 2014, 9(1): e86035-e86046.
- [18] ARCHARD JF. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. *J Appl Phys*, 1953, 24(8): 981-988.
- [19] STOLLER AP, JOHNSON TS, POPOOLA OO, *et al*. Highly crosslinked polyethylene in posterior-stabilized total knee arthroplasty: *In vitro* performance evaluation of wear, delamination, and tibial post durability [J]. *J Arthroplasty*, 2011, 26(3): 483-491.
- [20] HAIDER H, ALBERTS LR, LAURENT MP, *et al*. Comparison between force-controlled and displacement-controlled *in-vitro* wear testing on a widely used TKR implant [C]// Proceedings of Transactions of the 48th Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society. Dallas: [s.n.], 2002.
- [21] JOHNSON TS, LAURENT MP, YAO JQ, *et al*. Comparison of wear of mobile and fixed bearing knees tested in a knee simulator [J]. *Wear*, 2003, 255(s7-12): 1107-1112.
- [22] 齐玮, 刘玉杰. 高屈曲状态下膝关节静力稳定结构的生物力学研究进展[J]. *医用生物力学*, 2013, 28(2): 240-244.
- QI W, LIU YJ. Advance in biomechanics researches of major knee ligaments at high flexion angles [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(2): 240-244.