

文章编号:1004-7220(2018)03-0193-07

· 论 著 ·

高吻合度股胫关节面人工膝关节假体的磨损

丁文宇^{1,2,3}, 马淑芹^{1,4*}, 周星辰^{1,2}, 杨玉婧^{1,2}, 孙艳^{1,2,3}, 赵峰^{1,2}, 樊瑜波^{1,2,5}

(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 100083; 2. 北京航空航天大学 北京高精尖生物医学工程创新中心, 北京 102402; 3. 中国科学院 传感器技术国家实验室, 北京 100190; 4. 北京爱康宜城医疗器械股份有限公司, 北京 102200; 5. 国家康复辅具研究中心 老年功能障碍康复辅助技术北京市重点实验室, 北京 100176)

摘要:目的 探讨人工膝关节假体股胫关节面高吻合度对假体运动和衬垫磨损的影响。方法 设计和制作一款冠状面高吻合度膝关节假体,并用体外磨损实验和有限元模拟相结合的方法研究该假体衬垫的磨损。结果 体外试验和有限元模拟所得的衬垫质量磨损率分别为 (14.29 ± 3.19) mg/MC 和 14.67 mg/MC (million cycle, MC, 百万次循环)。5 MC 后,体外试验和有限元模拟得到的衬垫磨损区域大致吻合,在中部区域会出现较为严重的磨损。结论 有限元模拟与体外试验结果较为一致,股胫关节面冠状面高吻合度假体的磨损率较低。研究结果对高吻合度人工膝关节假体的磨损评估及临床应用具有实际意义。

关键词:全膝关节置换;高吻合度;体外磨损实验;有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2018.03.001

Wear Simulation of Tibiofemoral Joint Surface of Total Knee Prosthesis with High Conformity

DING Wenyu^{1,2,3}, MA Shuqin^{1,4*}, ZHOU Xingchen^{1,2}, YANG Yujing^{1,2}, SUN Yan^{1,2,3}, ZHAO Feng^{1,2}, FAN Yubo^{1,2,5}

(1. Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of the Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Advanced Innovation Centre for Biomedical Engineering, Beihang University, Beijing 102402, China; 3. State Key Laboratory of Transducer Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. Beijing AKEC Medical Co., Ltd., Beijing 102200, China; 5. Beijing Key Laboratory of Rehabilitation Technical Aids for Old-Age Disability, National Research Center for Rehabilitation Technical Aids, Beijing 100176, China)

Abstract: Objective To investigate the effect of the tibiofemoral joint surface with high conformity on total knee prosthesis motion and insert wear. **Methods** A type of knee prosthesis with a high coronal conformity was designed and manufactured, and its insert wear was studied by *in vitro* wear testing combined with finite element simulation. **Results** The mass wear rates calculated by the *in vitro* wear testing and finite element simulation were (14.29 ± 3.19) mg/MC and 14.67 mg/MC (MC, million cycle), respectively. After five MCs, the areas of the insert wear obtained by both the methods were basically consistent, and severe wear was found to occur in the

收稿日期:2017-08-15; 修回日期:2017-11-07

基金项目:国家自然科学基金项目(11072021,31200725,31470942,31670982),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:赵峰,讲师,硕士研究生导师,E-mail:fzhao@buaa.edu.cn;樊瑜波,教授,博士研究生导师,E-mail:yubofan@buaa.edu.cn

* 为共同第一作者

middle part of the insert. **Conclusions** The result of the finite element simulation coincided with that of the *in vitro* testing. The wear rate of the tibiofemoral joint surface of the total knee prosthesis with a high coronal conformity was relatively low. The research outcomes have practical significance for the evaluation and clinical application of the total knee prosthesis with a high conformity.

Key words: total knee replacement; high conformity; *in vitro* wear testing; finite element analysis

全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA)是用于治疗严重膝关节疾病的一种常见外科手术^[1]。术后假体的磨损和无菌性松动是假体失效的重要原因,而在临床最常用的金属对聚乙烯假体中,衬垫聚乙烯磨损颗粒诱发的骨吸收是引发假体无菌性松动的主要原因^[2-3]。由此可见,人工膝关节胫骨假体衬垫的磨损是影响TKA是否成功的关键因素之一。

目前,用于体外评估人工关节假体衬垫磨损的主要方法是在膝关节磨损试验机上依据ISO 14243标准对假体进行体外磨损实验。近年来,越来越多的研究者利用有限元仿真模拟方法评估胫骨假体磨损^[4-9]。体外磨损实验费钱费时,经过体外实验验证后的有限元磨损分析不失为一种有效的磨损预测方法。

在诸多磨损的影响因素中,膝关节股胫关节面的吻合程度(即胫骨关节面曲率与股骨关节面曲率的吻合程度,一般用两者曲率半径的比值表征)对术后膝关节运动有重要影响,进而显著影响假体衬垫的磨损^[10]。股胫关节面的吻合程度不仅影响人工膝关节的活动度,而且对假体衬垫上的接触应力有很大影响,而接触应力则是影响衬垫磨损的关键因素之一。Bartel等^[11]研究发现,增加股胫关节面的吻合程度有利于减小衬垫上的接触应力。Fregly等^[12]研究表明,逐步增加股胫关节面矢状面的吻合度,衬垫上的磨损逐步减小^[12]。但Blunn等^[13]却发现,股胫关节面吻合度越高,股胫关节面之间的相互限制性越强,在关节旋转过程中容易引起聚乙烯剥落磨损,从而增加假体磨损量。因此,高吻合度股胫关节面对人工膝关节假体衬垫磨损的影响还有待进一步深入研究。

本文设计了一款股胫关节面冠状面完全吻合的金属对聚乙烯人工膝关节假体,并应用体外磨损实验和有限元模拟计算对比分析的方法,研究该款人工膝关节假体聚乙烯衬垫的磨损。

1 材料与方法

1.1 高吻合度人工膝关节假体试件的设计与制作

设计一种临床常用的后稳定半限制型人工膝关节假体[见图1(a)]。股骨髁和胫骨平台采用铸造钴铬钼合金(CoCrMo),符合标准YY 0117.3/ISO 5832-4的材料规定。胫骨垫片采用超高分子量聚乙烯(UHMWPE)材料,符合标准GB 19701.2/ISO 5834-2中2级的材料规定。各部件的结构设计采用市场应用常见的构型及参数,而胫骨部件之间采用固定连接方式,避免背侧磨损对股胫关节面磨损的影响。

股胫关节面吻合度的设计为冠状面完全吻合,胫骨与股骨关节面曲率半径在冠状面的比值为1[见图1(b)];矢状面上的曲率采取目前临床应用最常见的多曲率设计。



① 股骨髁; ② 胫骨垫片; ③ 胫骨平台

图1 高吻合度人工股膝关节假体

Fig. 1 Artificial knee joint prosthesis with high conformity

(a) Picture of the sample, (b) Schematic diagram of the tibiofemoral joint surface with high conformity

样件加工制作由北京爱康宜城医疗器材股份有限公司完成,并严格按照医用人工膝关节的生产标准进行加工制作。股骨髁关节面的打磨抛光均采用数控加工设备进行加工,利用3D设计图形完成程序设定,通过程序控制完成股骨髁关节面的加工成形,能够保证与设计尺寸的吻合性以及假体之间的一致性。最终高抛光后关节面的粗糙度不超

过 $0.1 \mu\text{m}$ 。胫骨垫片同样采用数控加工设备进行加工, 关节面一体成形, 保证垫片成品与设计尺寸的吻合性。最终加工完成后, 关节面粗糙度保证不超过 $0.8 \mu\text{m}$ 。在完成所有机械化加工后, 对假体进行标识、清洗、包装及灭菌工序, 确保假体的洁净度。所有产品的加工过程均经严格的质量检测, 达到正式上市产品的同等要求。

1.2 体外磨损实验

依据 ISO 14243 标准的磨损实验方法, 对人工膝关节样件在膝关节模拟试验机上进行体外磨损实验 (在德国 EndoLab 实验室完成, 采用 EndoLab 的 6 工位磨损试验机)。磨损实验组包括 3 个试验件 (HF-1、HF-2、HF-3), 对照组使用 1 个对照件 (HF-C)。实验组的磨损采用 ISO 14243-1 运动和载荷, 包括轴向加载、屈曲运动、前后加载和胫骨旋转扭矩, 模拟人体正常水平行走的步态周期加载^[14]; 对照组在同样条件下, 只进行相同的轴向加载, 不做屈曲、前后和旋转运动。图 2 所示为实验过程中

4~5 MC (million cycle, MC, 百万次循环) 期间某个周期的轴向力、前后方向加载和旋转扭矩的实际加载曲线, 以及 3 个试验件的胫骨平台在此加载下的实际前后位移和旋转运动。结果表明, 实验的实际加载曲线与 ISO 标准加载曲线具有很好的一致性。样件浸泡在人工血清中, 维持温度 $(37 \pm 0.2) ^\circ\text{C}$, 在实验过程中每磨损 0.5 MC 后更换一次血清, 直至 5 MC 磨损。

分别在 0.5、1、2、3、4、5 MC 后的暂停和更换血清前, 采用 ISO 14243-2 标准中的称重法对衬垫样品的磨损量进行测量和记录, 得到实验组和对照组磨损质量随磨损次数的变化规律。每个样件修正后的磨损量用最小二乘法求得 (实验样件的磨损质量为其未修正磨损量减去对照组样件的未修正磨损量)。最后对 3 个实验样品的磨损质量取平均值, 得到该款膝关节假体衬垫的质量磨损率, 即每百万次磨损质量。

采用光学显微镜对 3 个样件的磨损表面进行观察, 将磨损明显区域用橙色标识, 磨损程度较小区域用黄色标识。

1.3 磨损的有限元模拟

利用 UG 8.5 和 SolidWorks 2012 对人工膝关节假体 (左膝) 进行几何模型重建, 导入 ABAQUS 6.11/Standard 中建立三维有限元分析模型 (见图 3)。模型包括股骨髁和衬垫两个部分, 股骨髁设置为刚体, 衬垫材料属性设置为线弹性, $E =$

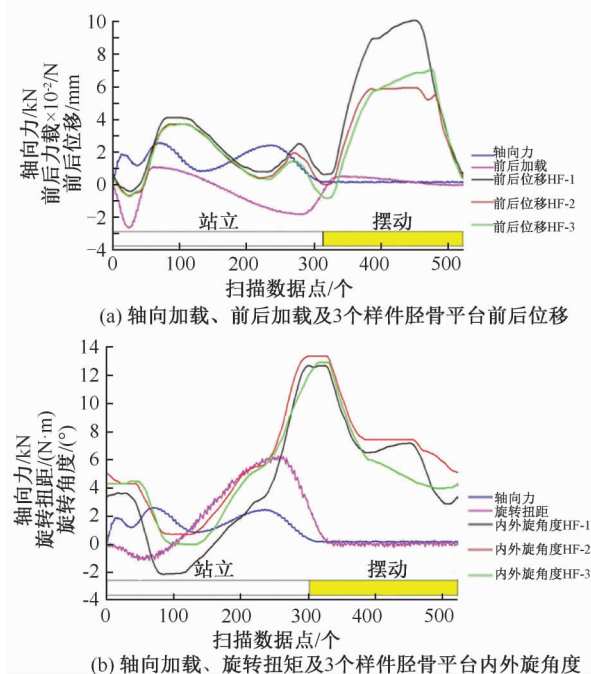
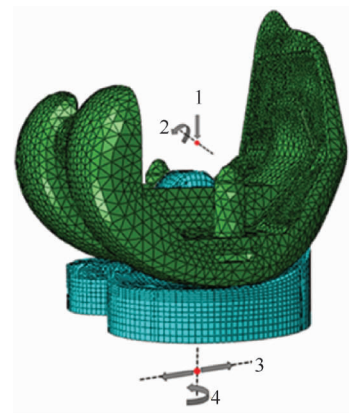


图 2 样件的实际加载与运动

Fig. 2 Actual loading and movement of samples

- (a) Axial force, anterior-posterior force and anterior-posterior displacement for the tibial trays of three samples,
(b) Axial force, torque and rotations for the tibial trays of three samples



1 - 轴向前后力, 2 - 屈膝角度, 3 - 前后载荷, 4 - 内外旋力矩

图 3 膝关节假体有限元模型及加载控制条件

Fig. 3 Finite element model of knee prosthesis and loading control conditions

463 MPa, $\nu = 0.46$ ^[15]。衬垫主要区域采用8节点六面体(C3D8R)网格划分,股骨髁采用四面体(C3D4)网格划分。股骨髁与参考点设置刚体耦合,股骨髁与衬垫接触面间设置罚函数接触,切向方向库伦摩擦系数为0.07,法向方向为硬接触^[15]。

根据ISO 14243-1标准对模型施加载荷和边界条件,通过参考点对股骨髁施加轴向载荷和设置屈膝角度,其他4个自由度被约束;对衬垫设置内外旋力矩和前后载荷,轴向运动和屈曲方向运动被约束,其他两个自由度随动。

根据Archard磨损理论,UHMWPE衬垫关节面在局部某点处的线性磨损可表达为^[16]:

$$H = KPS$$

式中: H 为线性磨损深度; P 为接触应力; S 为相对摩擦距离; K 为磨损因子,本文采用Knight等^[15]根据一些不同体外磨损实验得到的磨损因子的均值, $K = 264 \mu\text{m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。

表1 假体衬垫体外磨损实验测得的质量改变

Tab. 1 Quality change of prosthesis inserts obtained from *in vitro* wear testing

试件磨损 次数/MC	HF-1		HF-2		HF-3		HF-C	
	质量/g	磨损质量/mg	质量/g	磨损质量/mg	质量/g	磨损质量/mg	质量/g	磨损质量/mg
0.0	19.904 40	0.00	19.881 19	0.00	19.905 12	0.00	19.855 79	0.00
0.5	19.900 80	4.92	19.880 80	1.71	19.903 34	3.10	19.857 11	-1.32
1.0	19.896 60	10.51	19.875 50	8.41	19.900 66	7.17	19.858 50	-2.71
2.0	19.880 55	28.06	19.865 64	19.77	19.890 01	19.32	19.860 00	-4.21
3.0	19.857 47	52.14	19.852 93	33.47	19.873 81	36.52	19.861 00	-5.21
4.0	19.841 69	68.92	19.841 97	45.44	19.863 57	47.77	19.862 00	-6.22
5.0	19.826 04	85.83	19.826 93	61.73	19.854 07	58.52	19.863 26	-7.47

随着磨损次数的增加,衬垫的磨损量逐渐增加,经过5 MC磨损后,3个试样中HF-1质量磨损最大,为85.83 mg;试样HF-3质量磨损最小,为58.52 mg。由试件质量随磨损次数的变化曲线可知,质量改变较好地呈现线性变化趋势;做最小二乘法线性拟合,线性回归系数 $R^2 \geq 0.966$ (见图4)。HF-1的质量磨损率最大,为17.96 mg/MC;HF-3的质量磨损率最小,为12.37 mg/MC;实验组3个试样的平均质量磨损率为 (14.29 ± 3.19) mg/MC。

通过光学显微镜观察3个实验样件的衬垫表面磨损情况,并将每个样件表面分为几个区域。其关节面中部靠后区域(橙色区域)划痕较深,表面发生凹陷和变形,部分区域发生剥离现象,磨损明显;

利用ABAQUS自适应网格技术,调取子程序UMESHMOTION^[17]进行衬垫磨损的模拟计算。首先,用ISO标准的步态运动和载荷对摩擦副的动力学进行有限元计算,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,根据计算的某节点的线性磨损,沿法线方向移动该衬垫表面节点。依次迭代计算10次,每次0.5 MC,共计完成5 MC的磨损模拟计算。模拟得到的磨损体积,可通过UHMWPE的密度转换为磨损质量。UHMWPE密度则采用密度天平法进行测量,计算4个衬垫的平均密度。

2 结果

2.1 体外磨损实验结果

假体衬垫的初始质量及经过0.5、1、2、3、4、5 MC体外磨损实验后的质量变化及质量磨损如表1所示。

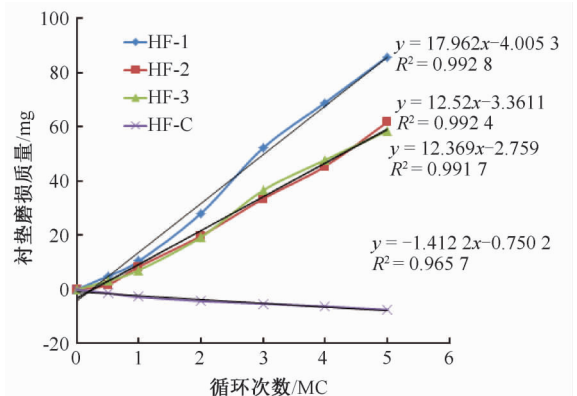


图4 体外磨损实验测得的衬垫质量磨损及其线性拟合结果

Fig. 4 Insert wear obtained from *in vitro* wear testing and its linear fitting result

黄色区域划痕较细, 磨损程度较小[见图 5(a)]。

2.2 有限元磨损模拟结果

通过有限元模拟衬垫 5 MC 步态载荷下的磨

损, 其衬垫关节面上磨损分布如图 5(b) 所示。可见磨损分布主要集中在衬垫接触面的中部区域, 而且左右两边分布较为均匀对称。

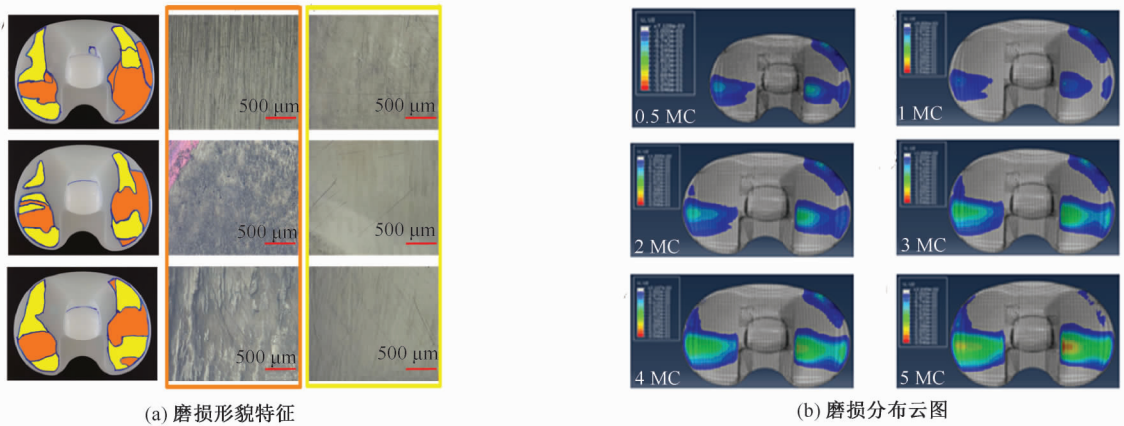


图 5 衬垫关节面磨损形貌及磨损分布云图

Fig. 5 Wear morphology and distribution nephogram for joint surface of the inserts (a) Wear morphology, (b) Wear distributions

通过有限元模拟得到不同磨损次数后的体积磨损量, 实验测得 UHMWPE 衬垫的密度为 $(0.93 \pm 0.06) \text{ g/cm}^3$, 进而得到假体衬垫在不同磨损次数后的质量磨损。5 MC 后, 其质量磨损总量为 73.84 mg。对有限元模拟的不同磨损次数的质量磨损做线性回归, 得到质量磨损率为 14.67 mg/MC , $R^2 = 0.9999$ 。体外磨损实验和有限元模拟得到的质量磨损对比结果表明, 两者非常接近(见图 6)。

状面完全吻合的人工膝关节假体进行 5 MC 步态体外磨损实验和有限元磨损模拟实验, 并从磨损量和磨损位置上对比分析两种实验方法所得的结果。

在磨损量上, 有限元模拟结果为 14.67 mg/MC , 体外磨损实验结果为 $(14.29 \pm 3.19) \text{ mg/MC}$, 两者结果非常一致, 相差仅 2.7%, 提示 Archard 磨损算法理论可能很好地适用于本文设计的这款人工膝关节的磨损模拟。有限元模拟磨损结果较实验结果稍大, 推测有限元模拟是一种理想的线性磨损情况, 模型中设置衬垫部分为线弹性属性, 与实际模型存在差异; 同时, 整个模拟磨损过程中设定载荷为理想恒定, 而在磨损试验机上的载荷并非如此, 但两者在磨损量上结果相近。Stoller 等^[18] 实验测得衬垫磨损量为 14.2 mg/MC , 王川等^[17] 利用有限元模拟计算的磨损体积为 $16.94 \text{ mm}^3/\text{MC}$; 与上述文献数据的对比结果表明, 本文的磨损量结果合理准确。同时, 也有部分学者通过实验测得较大的磨损率。Brandt 等^[19] 根据 ISO 标准对 6 个 CR 型人工膝关节假体样件进行体外磨损测试, 测得平均磨损率为 22.07 mg/MC 。Barnett 等^[20] 研究结果表明, UHMWPE 衬垫的磨损率为 $7 \sim 39 \text{ mg}$ 。由此可见, 本文设计的股胫关节面冠状面高吻合度人工膝关节假体的磨损率还是较低的。

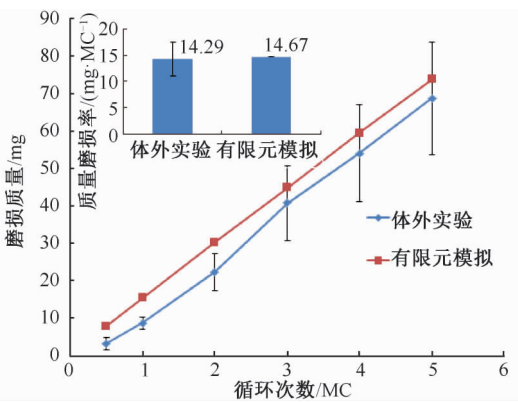


图 6 有限元模拟与体外实验的质量磨损结果对比

Fig. 6 Comparison of mass wear between the finite element simulation and *in vitro* wear testing

3 讨论

本研究通过对一款自主设计的股胫关节面冠

在磨损位置上, 体外磨损实验样件和膝关节假

体有限元模型的主要磨损区域位于股胫关节面的中部区域,但体外磨损实验得到的股胫关节面磨损区域与有限元模拟结果存在差异。体外磨损实验中,关节面上磨损区域较广,衬垫右侧磨损区域较左侧稍大,磨损分布不均匀;有限元模拟的磨损区域则集中在中部区域,其左右两侧分布较为均匀。磨损区域存在差异的主要原因有:①在有限元磨损云图中设置了显示磨损区域的最小线性磨损值,即当线性磨损深度不超过 $10\ \mu\text{m}$ 时,磨损区域为非磨损区域(灰色区域)。但在体外磨损样件上此类部分区域是存在轻微划痕的,在实际观测中也进行了标记;②有限元模拟的是较理想的加载和运动环境,而体外磨损实验中样件上的实际载荷和运动与期望值有一定差异;③有限元模拟的磨损是一种理想的线性磨损,对于体外实验中出现的点蚀、剥离等磨损形式无法模拟,故造成了磨损区域存在差异。但总体上,有限元模拟得到的磨损在主要磨损区域上的位置与体外磨损结果还是较为一致。

本文关于股胫关节面吻合程度对衬垫上磨损的研究,是从其冠状面吻合程度出发的。而其矢状面上的吻合程度对于衬垫的运动及表面接触应力也具有重要影响。Ardestani 等^[21]通过有限元方法改变股胫关节面矢状面的吻合情况,利用主成分分析法发现,矢状面上吻合程度的改变较大地影响了衬垫上的接触应力及前后方向的位移。因此,需要综合考虑股胫关节面矢状面和冠状面两者的吻合程度。

本文在有限元模拟上的局限性如下:①所利用的 Archard 磨损理论是一个线性磨损预测算法,无法模拟实验中出现的分层、点蚀、剥离和断裂等其他磨损形式^[22]。对于 UHMWPE 关节在磨损中发生的交叉剪切运动和蠕变反应等^[23], Archard 磨损算法理论也并未将其影响因素包含在内。这都是导致误差的原因。因此,进一步完善算法也是下一步工作之一;②假体模型的股胫关节面冠状面上还需设置更多的曲率参数(即不同吻合程度)进行对比研究,矢状面上的曲率参数也可进一步调整,用于选取最优的设计结构;③模型在有限元加载上只使用了水平步态加载,后续可研究其他常见日常活动(如上下楼、深蹲等运动)的加载。

参考文献:

- [1] KURTZ SM, ONG KL, LAU E, *et al.* International survey of primary and revision total knee replacement [J]. *Int Orthop*, 2011, 35(12): 1783-1789.
- [2] NAUDIED DD, AMMEEN DJ, ENGH GA, *et al.* Wear and osteolysis around total knee arthroplasty [J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2007, 15(1): 53-64.
- [3] 王成焘, 黄嘉华, 戴魁戎. 人工关节失效的统计分析及其在技术发展中的重要作用[J]. *医用生物力学*, 2012, 27(1): 1-6.
WANG CT, HUANG JH, DAI KR. Statistical analysis on artificial joint failure and its role in technology development [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(2): 1-6.
- [4] 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.
- [5] OBRIEN 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(59): 284-291.
- [6] 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.
- [7] ABDELGAIED A, LIU F, BROCKETT C, *et al.* Computational wear prediction of artificial knee joints based on a new wear law and formulation [J]. *J Biomech*, 2011, 44(6): 1108-1116.
- [8] 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.
- [9] KANG KT, SON J, KIM HJ, *et al.* Wear predictions for UHMWPE material with various surface properties used on the femoral component in total knee arthroplasty: A computational simulation study [J]. *J Mater Sci Mater Med*, 2017, 28(7): 105.
- [10] 张先龙. 股胫关节吻合性对人工膝关节聚乙烯磨损的影响[J]. *中华外科杂志*, 2001, 39(3): 248-250.
- [11] BARTEL DL, RAWLINSON JJ, BURSTEIN AH, *et al.* Stresses in polyethylene components of contemporary total knee replacements [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1995, 317: 76-82.
- [12] FREGLY BJ, MARQUEZ-BARRIENTOS C, BANKS SA, *et al.* Increased conformity offers diminishing returns for reducing total knee replacement wear [J]. *J Biomech Eng*, 2010, 132(2): 021007.

- [13] BLUNN GW, JOSHI RJ, MINNS RJ, *et al.* Wear in retrieved condylar knee arthroplasties. A comparison of wear in different designs of 280 retrieved condylar knee prostheses [J]. *J Arthroplasty*, 1997, 12(3): 281-290.
- [14] ISO 14243-1. Implants for surgery. Wear of total hip-joint prostheses. Part 1: Loading and displacement parameters for wear-testing machines and corresponding environmental conditions for test [S]. 2009.
- [15] 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.
- [16] ARCHARD JF. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. *J Appl Phys*, 1953, 24(8): 981-988.
- [17] 王川, 赵峰, 丁文字, 等. 上楼梯对人工膝关节假体磨损影响的有限元研究 [J]. *医用生物力学*, 2017, 32(2): 109-114.
WANG C, ZHAO F, DING WY, *et al.* Finite element study on total knee prosthesis wear during stair ascent [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(2): 109-114.
- [18] 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.
- [19] BRANDT JM, CHARRON KDJ, ZHAO L, *et al.* Commissioning of a displacement-controlled knee wear simulator and exploration of some issues related to the lubricant [J]. *Proc Inst Mech Eng*, 2011, 225(8): 736-752.
- [20] BARNETT PI, FISHER J, AUGER DD, *et al.* Comparison of wear in a total knee replacement under different kinematic conditions [J]. *J Mater Sci Mater Med*, 2001, 12(10): 1039-1042.
- [21] ARDESTANI MM, MOAZEN M, JIN Z. Contribution of geometric design parameters to knee implant performance: Conflicting impact of conformity on kinematics and contact mechanics [J]. *Knee*, 2015, 22(3): 217-224.
- [22] STRICKLAND MA, DRESSLER MR, TAYLOR M. Predicting implant UHMWPE wear in-silico: A robust, adaptable computational-numerical framework for future theoretical models [J]. *Wear*, 2011, 274(3): 100-108.
- [23] PETRELLA AJ, ARMSTRONG JR, LAZ PJ, *et al.* A novel cross-shear metric for application in computer simulation of ultra-high molecular weight polyethylene wear [J]. *Comput Method Biomed*, 2012, 15(11): 1223-1232.