

## 单间室膝关节假体衬垫在步态载荷下的磨损性能仿真分析

<https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4344.3775>

王献抗, 张月静, 杨友, 刘军

2095-4344.3775

投稿日期: 2020-04-11

送审日期: 2020-04-18

采用日期: 2020-05-30

在线日期: 2020-09-29

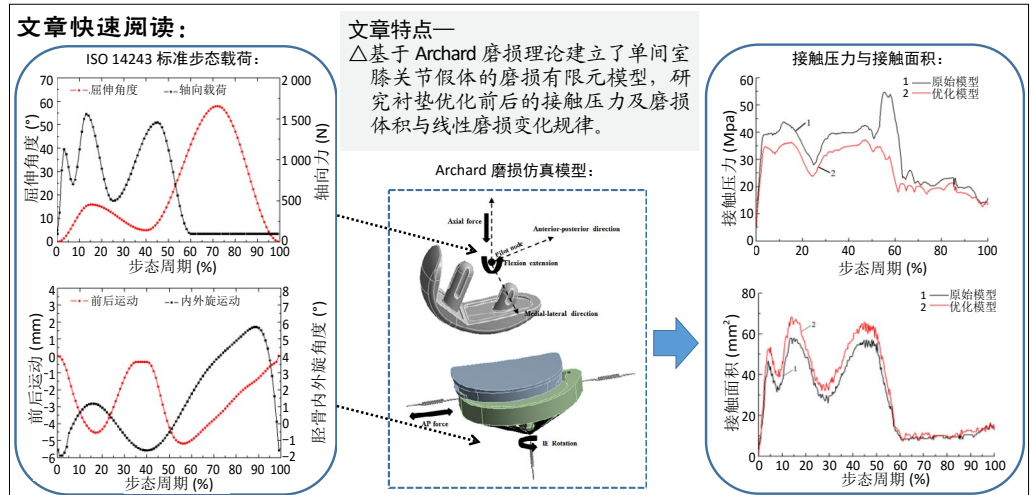
中图分类号:

R459.9; R-331; R318.01

文章编号:

2095-4344(2021)12-01831-05

文献标识码: A



## 文题释义:

**单间室膝关节假体:** 用于对膝关节单侧病变间室进行表面置换, 不但手术切口小、术中截骨量少, 而且不影响或较少影响其他正常关节间室, 不破坏伸膝装置, 可保留十字韧带及骨软骨, 因此单髁膝关节置换后恢复快、并发症少, 保存了膝关节的正常运动和本体感觉。

**衬垫:** 目前单间室膝关节假体根据运动方式不同分为活动平台型和固定平台型。该文所述假体为固定平台型单间室假体, 包括股骨髁、衬垫与胫骨平台, 其中股骨髁通过骨水泥固定于股骨远端, 材质为钴铬钼, 胫骨平台通过骨水泥固定于胫骨近端, 材质为钴铬钼, 衬垫通过机械连接固定于胫骨平台, 材质为高交联聚乙烯, 与股骨髁关节面配合为关节摩擦副。由于股骨髁与衬垫的接触面积较小, 造成接触应力较大, 临床中易出现磨损问题, 造成衬垫失效。

## 摘要

**背景:** 目前, 有限元分析多用于全膝关节假体衬垫的磨损仿真研究。

**目的:** 利用有限元分析单间室膝关节假体衬垫形状优化对磨损性能的影响。

**方法:** 基于 Archard 磨损理论建立了单间室膝关节假体的磨损有限元模型, 研究了衬垫优化前后的接触压力及磨损性能变化规律。

**结果与结论:** ①在 ISO 标准步态载荷工况条件下, 优化前后的衬垫接触压力分别为 54.7 MPa 和 37.2 MPa, 优化后的衬垫接触压力降低了 32%; 优化前后的衬垫线性磨损分别为  $4.38 \times 10^{-5}$  mm 和  $3.15 \times 10^{-5}$  mm, 优化后的衬垫线性磨损深度降低了 28%; ②结果表明优化后的衬垫可明显提高线性磨损性能, 研究结果对单间室膝关节衬垫设计、磨损性能评估以及临床应用具有实际意义。

**关键词:** 骨; 材料; 假体; 单间室膝关节假体; 胫骨衬垫优化; 步态; 载荷; 磨损仿真

## Simulation analysis of wear performance for tibial insert of unicompartmental knee arthroplasty prosthesis under gait load

Wang Xiankang, Zhang Yuejing, Yang You, Liu Jun

Tianjin Key Laboratory of Functional and Personalized Research on Bone Implant Interfaces, Just Huajian Medical Equipment (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300190, China

Wang Xiankang, Master, Engineer, Tianjin Key Laboratory of Functional and Personalized Research on Bone Implant Interfaces, Just Huajian Medical Equipment (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300190, China

**Corresponding author:** Wang Xiankang, Tianjin Key Laboratory of Functional and Personalized Research on Bone Implant Interfaces, Just Huajian Medical Equipment (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300190, China

## Abstract

**BACKGROUND:** At present, finite element analysis is mostly used in the simulation study of wear of the total knee prosthesis pad.

**OBJECTIVE:** To study the effect of shape optimization for the tibial insert of the unicompartmental knee prosthesis on wear performance using finite element analysis.

天津市骨植入物界面功能化与个性化研究企业重点实验室, 嘉思特华剑医疗器械(天津)有限公司, 天津市 300190

第一作者: 王献抗, 男, 1988 年生, 河南省南阳市人, 汉族, 硕士, 工程师, 主要从事骨科植入物产品研发及生物力学研究。

通讯作者: 王献抗, 天津市骨植入物界面功能化与个性化研究企业重点实验室, 嘉思特华剑医疗器械(天津)有限公司, 天津市 300190

<https://orcid.org/0000-0002-5038-0940> (王献抗)

**基金资助:** 天津市科技计划项目生物医学工程科技重大专项 (18ZXSGSY00010), 项目负责人: 刘军, 项目名称: 国人单间室膝关节假体系统核心技术的研发; 第三批天津市人才发展特殊支持计划-高层次创新创业团队, 项目负责人: 刘军

引用本文: 王献抗, 张月静, 杨友, 刘军. 单间室膝关节假体衬垫在步态载荷下的磨损性能仿真分析 [J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(12):1831-1835.



**METHODS:** Based on the Archard wear theory, the wear finite element model of the unicompartmental knee prosthesis was established. The contact pressure and wear performance of the tibial insert before and after optimization were studied.

**RESULTS AND CONCLUSION:** (1) Under the condition of ISO standard gait load, for the contact pressure, the tibial insert contact pressure before and after optimization was 54.7 MPa and 37.2 MPa, respectively, and the tibial insert contact pressure was reduced by 32%. For linear wear, the linear wear of the tibial insert before and after optimization was  $4.38 \times 10^{-5}$  mm and  $3.15 \times 10^{-5}$  mm, respectively, and the linear wear depth of the tibial insert was reduced by 28%. (2) The results show that the liner wear performance can be significantly improved after optimization. The results of the study have practical significance for unicompartmental knee tibial insert design, wear performance assessment and clinical application.

**Key words:** bone; material; prosthesis; unicompartmental knee prosthesis; tibial insert optimization; gait load; wear simulation

**Funding:** Major Special Project of Biomedical Engineering Science and Technology of Science and Technology Plan Project of Tianjin, No. 18ZXSGSY00010 (to LJ); the Third Batch of Tianjin Talent Development Special Support Plan-High-Level Innovation and Entrepreneurship Team (to LJ)

**How to cite this article:** WANG XK, ZHANG YJ, YANG Y, LIU J. Simulation analysis of wear performance for tibial insert of unicompartmental knee arthroplasty prosthesis under gait load. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2021;25(12):1831-1835.

## 0 引言 Introduction

单间室膝关节置换常用于治疗中期膝关节炎,具有微创、快速康复、并发症率低、术后关节功能更接近生理状态等优点,然而衬垫磨损会引起骨溶解,是限制假体寿命的主要原因<sup>[1-3]</sup>。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。体外磨损实验费时费力,而通过有限元进行磨损分析不失为一种有效的磨损预测方法。

目前,有限元分析多用于全膝关节假体衬垫的磨损仿真研究,如:2007年美国的 KNIGHT 等<sup>[4]</sup>对 CR 型全膝关节假体在步态载荷条件下进行了 500 万次的磨损仿真,得到了磨损过程的线性磨损与体积磨损曲线,将仿真结果与磨损实验进行了对比,具有较好的一致性。2009年日本的 TODO 等<sup>[5]</sup>对 PS 型全膝关节假体在深蹲载荷下的磨损性能进行了研究,得到了屈曲过程中的应力与磨损深度变化,从而对膝关节假体损伤和失效位置进行了评估。2009年加拿大的 WILLING 等<sup>[6]</sup>通过修订全膝关节假体股骨髁与衬垫的冠状面与矢状面半径,并根据 ISO 标准进行了磨损仿真研究,结果表明优化后的假体可明显提高磨损性能。2017年北京航空航天大学的王川等<sup>[7]</sup>基于 Archard 磨损理论对步态与上楼梯载荷对全膝关节衬垫磨损的影响进行了磨损仿真研究,结果表明上楼梯活动会明显增加衬垫的磨损。2018年北京航空航天大学丁文宇等<sup>[8]</sup>对胫股关节冠状面高吻合度假体进行了磨损仿真与体外实验,结果表明冠状面高吻合度假体可降低衬垫的磨损率。而用于单间室膝关节衬垫的优化设计及磨损性能评估国内外文献尚无报道,故该文研究之。

实验基于市面上常见的浅弧型单髁衬垫,对衬垫冠状面与矢状面进行了几何优化,建立了单间室膝关节衬垫磨损仿真模型,并对优化前后的衬垫接触压力、磨损体积以及线性磨损进行了对比分析。

## 1 材料和方法 Materials and methods

**1.1 设计** 单间室膝关节假体衬垫在步态载荷下的磨损性能仿真分析和优化设计。

**1.2 时间及地点** 仿真分析于 2019 年 11 至 12 月在天津市骨植入物界面功能化与个性化研究企业重点实验室完成。

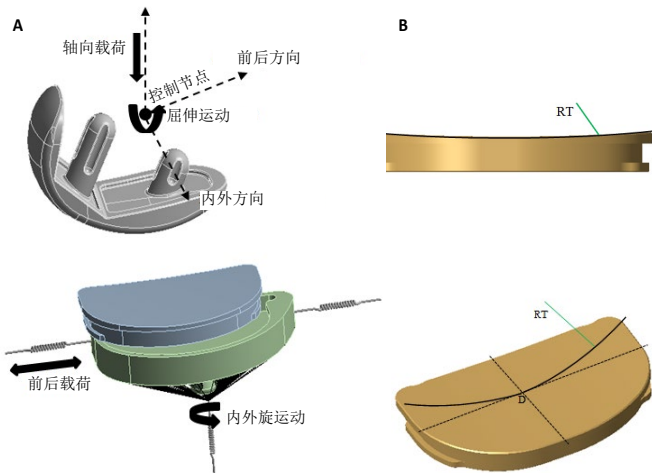
**1.3 材料** 三维建模软件 Creo(美国 PTC 公司);有限元分析软件 Ansys(美国 ANSYS 公司)。采用三维建模软件 Creo 设计了 2 种固定型单间室膝关节假体,将 2 种三维模型分别导入有限元分析软件 ANSYS,基于 Archard 磨损理论,对两种类型衬垫在步态载荷条件下进行了磨损仿真分析。

### 1.4 实验方法

**1.4.1 模型建立** 如图 1 所示,基于现有市场上常见的固定型单间室膝关节假体衬垫设计,衬垫摩擦面大部分为平面,或利用三维软件通过矢状面单一半径拉伸切除将衬垫设计为浅弧面。通过有限元软件 Ansys 建立其磨损有限元模型并施加边界条件,几何模型包含股骨髁、衬垫与胫骨平台。其中,股骨髁的矢状面远端曲率半径为 34 mm,屈曲半径为 17 mm,冠状面曲率半径为 24 mm。胫骨衬垫矢状面半径 RT 为 345 mm,衬垫最低点 D 位于衬垫中心位置,胫骨平台与衬垫底面为卡锁式配合。胫骨衬垫采用 8 节点六面体单元进行划分,股骨髁与胫骨平台的材质为钴铬钼,弹性模量为 200 GPa,股骨髁与胫骨平台简化为刚体,与参考点设置了刚体耦合,采用四边形网格进行划分。衬垫假体采用的材料为高交联超高分子量聚乙烯,采用非线性材料属性,其弹性模量为 544.6 MPa,泊松比为 0.46,屈服强度 19.9 MPa,切线模量 54.46 MPa。股骨髁与衬垫及衬垫与胫骨平台间的接触算法为法向拉格朗日算法,摩擦系数为 0.04。

优化后的衬垫模型如图 2B 所示,胫骨衬垫矢状面前端半径 RAT 为 160 mm,胫骨衬垫矢状面后端半径 RPT 为 180 mm,衬垫冠状面半径 RF 为 58 mm,衬垫最低点 D 位于衬垫中心偏后 4.5 mm 位置;衬垫轨迹线为一条空间曲线,在俯视图方向为圆弧-直线相切线,在矢状面为双半径相切曲线;在冠状面半径较矢状面半径小,以此降低接触应力,减少磨损,同时形成中心路径松弛,降低股骨在衬垫表面滚动、滑动与旋转时的阻力,从而最大程度上恢复膝关节正常运动轨迹。有限元模型如图 2 所示,材料参数及边界约束与原始模型保持一致。

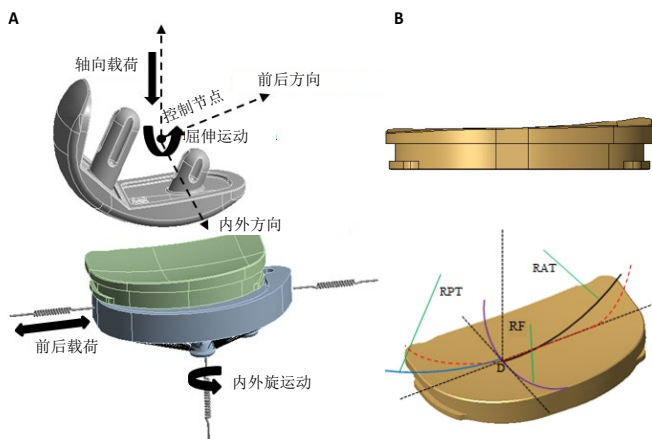
**1.4.2 边界条件** 依据全膝关节置换假体磨损测试标准 ISO 14243-3:2004 对单髁假体施加了步态载荷,包括屈曲运动、轴向载荷、前后位移及胫骨平台旋转,所有数据曲线需分成 100 个载荷步施加到模型中,选取胫骨相对股骨向前移动和内旋为正方向。通过控制节点对股骨髁施加步态周期-屈曲



图注: A 为有限元模型 (原始模型); B 为衬垫三维模型 (原始模型), RT 为胫骨衬垫矢状面半径

图 1 | 单间室膝关节假体磨损有限元模型及位移控制边界 (原始模型)

Figure 1 | Unicompartmental knee joint prosthesis wear finite element model and displacement control boundary (original model)



图注: A 为有限元模型 (优化模型); B 为衬垫三维模型 (优化模型), RAT 为胫骨衬垫矢状面前端半径, RPT 为胫骨衬垫矢状面后端半径, RF 为衬垫冠状面半径, D 为衬垫最低点

图 2 | 单间室膝关节假体磨损有限元模型及位移控制边界 (优化模型)

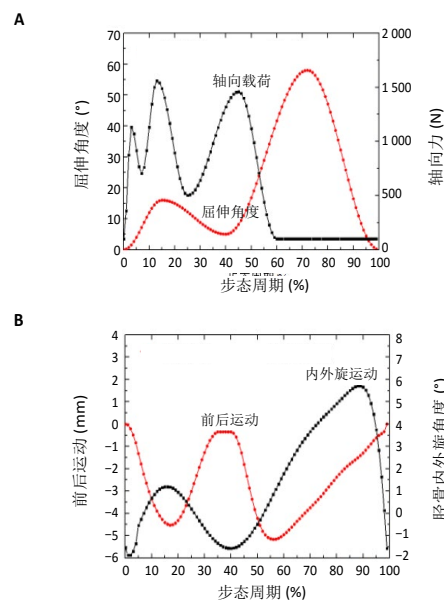
Figure 2 | Unicompartmental knee joint prosthesis wear finite element model and displacement control boundary (optimization model)

角度 / 轴向载荷, 通过控制节点对胫骨平台施加步态周期 - 前后位移 / 内外旋角度。对单间室膝关节假体系统施加边界条件, 其中, 轴向载荷采用全膝载荷的 60% 进行加载。步态过程中膝关节运动及受力曲线如图 3 所示。

屈膝角度和轴向力通过控制节点施加在股骨髁上, 股骨髁剩下的 4 个自由度被完全约束。胫骨内外旋与前后位移通过控制节点施加在胫骨平台上, 其余自由度完全约束。考虑到韧带对膝关节内外旋活动与前后运动的影响, 对胫骨平台内外旋施加扭簧, 刚度系数为  $0.6 \text{ Nm/deg}^{[5]}$ 。对胫骨平台的前后方向施加一对非线性弹簧, 弹簧提供了胫骨前后方向的位移约束, 弹簧刚度数据通过体外实验数据计算获得, 非线性弹簧函数关系为<sup>[9]</sup>:

$$F=1.9919d^2+0.0292d$$

其中,  $F$  为弹簧力,  $d$  为弹簧压缩量。



图注: A 为步态周期 - 屈曲角度 / 轴向载荷, B 为步态周期 - 前后位移 / 内外旋角度

图 3 | 步态过程中膝关节运动及受力

Figure 3 | Motion and force of the knee during the gait cycle

1.4.3 磨损计算预测 Archard 磨损模型是目前国内外学者最常用的经典微动磨损理论, 其计算公式为:

$$V=KF_N S/H \quad (1)$$

其中:  $V$  为磨损体积,  $K$  为无量纲磨损系数,  $F_N$  为法向载荷,  $S$  为滑移距离,  $H$  为较软材料的硬度。

为定量分析衬垫体积磨损, 引入磨损率公式<sup>[11]</sup>:

$$\text{磨损率} = \text{磨损体积 } V / \text{滑动距离 } S (\text{mm}^3/\text{m}) \quad (2)$$

Archard 线性磨损计算公式为<sup>[11]</sup>:

$$\delta_{\text{wear}} = k \sum_{i=1}^n \sigma_i |d_i| \Delta t_i \quad (3)$$

其中:  $\delta$  为磨损造成的材料损失厚度;  $k$  为恒定的磨损因子;  $\sigma$  为接触应力;  $d$  为相对滑动距离;  $\Delta t$  为时间增量;  $i$  为增量步数;  $n$  为每个循环总的增量步数;

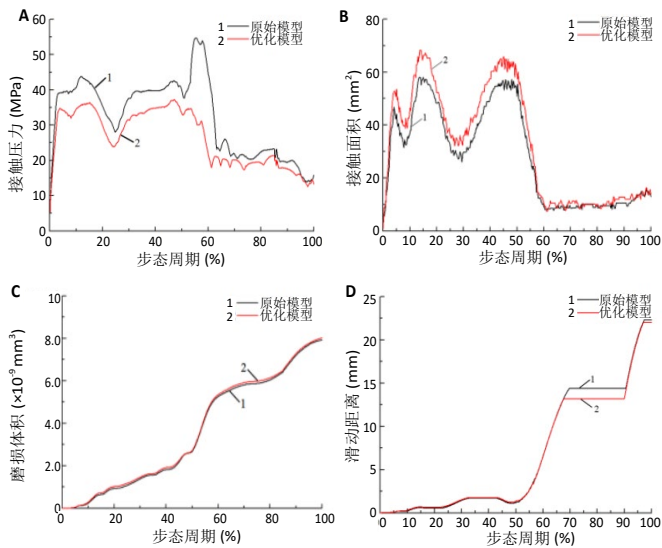
Cross-Linked 高交联 UHMWPE 衬垫关节面的磨损因子为  $K=5.24 \times 10^{-11} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})^{[10]}$ , 衬垫硬度为  $H=65.39$ 。首先, 对衬垫磨损过程进行有限元计算, 并在每个增量步提取衬垫表面节点编号、接触压力和摩擦距离等数据。然后, 根据 Archard 磨损公式计算每个表面节点的线性磨损。

1.5 主要观察指标 衬垫优化前后的接触压力及磨损性能变化规律。

## 2 结果 Results

2.1 接触压力及体积磨损对比 两种衬垫接触压力、接触面积、体积磨损与滑动距离对比曲线如下图 4 所示, 分析可知在整个步态周期, 优化后的衬垫接触压力均低于原始衬垫的接触压力, 且原始衬垫的最大接触压力为  $54.7 \text{ MPa}$ , 优化后的衬垫接触压力为最大  $37.2 \text{ MPa}$ , 最大接触压力降低了 32%。优化后的衬垫接触面积均大于原始衬垫的接触面积, 优化后的衬垫最大接触面积为  $68.3 \text{ mm}^2$ , 原始衬垫最大接触面





图注: A 为接触压力曲线, 原始衬垫的最大接触压力为 54.7 MPa, 优化后的衬垫接触压力为最大 37.2 MPa; B 为接触面积曲线, 原始衬垫最大接触面积为 57.9 mm<sup>2</sup>, 优化后的衬垫最大接触面积为 68.3 mm<sup>2</sup>; C 为体积磨损曲线, 原始模型的衬垫磨损体积为 7.92×10<sup>9</sup> mm<sup>3</sup>, 优化模型的衬垫磨损体积增加为 8.02×10<sup>9</sup> mm<sup>3</sup>; D 为滑动距离曲线, 在步态周期的 70% 处, 优化后的衬垫滑动距离存在明显降低

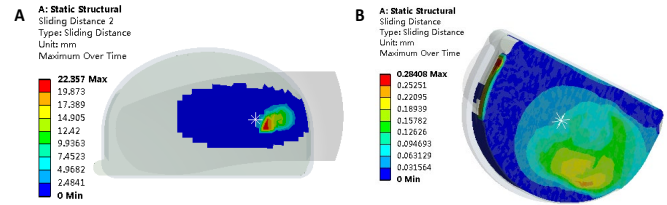
图 4 | 两种衬垫接触压力、接触面积、体积磨损与滑动距离对比曲线  
Figure 4 | Comparison of the contact pressure, contact area, volume wear and sliding distance of the two kinds of tibial inserts

积为 57.9 mm<sup>2</sup>。对于体积磨损, 原始模型的衬垫磨损体积为 7.92×10<sup>9</sup> mm<sup>3</sup>, 磨损率为 0.354×10<sup>9</sup> mm<sup>3</sup>/m; 优化模型的衬垫磨损体积增加为 8.02×10<sup>9</sup> mm<sup>3</sup>, 磨损率为 0.364×10<sup>9</sup> mm<sup>3</sup>/m。在步态周期的 70% 处, 优化后的衬垫滑动距离存在明显降低。

**2.2 滑动距离及线性磨损对比** 图 5 为原始模型衬垫在步态周期载荷条件下的摩擦面与背面滑动距离, 正面滑动距离为 22.36 mm, 背面滑动距离为 0.28 mm; 图 6 为优化模型衬垫在步态周期载荷条件下的摩擦面与背面的滑动距离, 正面滑动距离为 22.03 mm, 背面滑动距离为 0.25 mm。根据 Archard 磨损模型可知, 滑动距离降低将有助于磨损的降低。根据线性磨损公式:  $\delta_{wear} = k \sum_{i=1}^n \sigma_i |d_i| \Delta t_i$ , 分别对两种衬垫磨损模型在每个增量步下, 接触应力、滑动距离与时间增量步相乘后求和得出衬垫的磨损深度, 通过计算得出: 原始模型的衬垫线性磨损深度为 4.38×10<sup>-5</sup> mm, 优化模型的衬垫线性磨损深度为 3.15×10<sup>-5</sup> mm, 优化模型的衬垫线性磨损深度降低了 28%。

### 3 讨论 Discussion

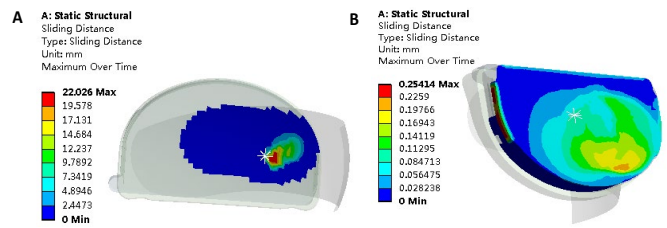
实验基于现有市场上常见的固定型单间室膝关节假体衬垫对其进行了优化设计, 同时在步态载荷条件下对 2 种衬垫进行了接触压力与磨损性能的对比研究。对于接触压力, 原始衬垫的接触压力为 54.7 MPa, 优化后的衬垫接触压力为 37.2 MPa, 接触压力降低了 32%。对于体积磨损, 原始模型的衬垫磨损率为 0.354×10<sup>9</sup> mm<sup>3</sup>/m, 优化模型的衬垫磨损率为 0.364×10<sup>9</sup> mm<sup>3</sup>/m, 磨损率稍有增加。英国利兹大学的 BARBOUR 等<sup>[10]</sup> 通过对衬垫进行体外实验与仿真, 研究表



图注: A 为衬垫表面滑动距离, 为 22.36 mm; B 为衬垫背面滑动距离, 为 0.28 mm

图 5 | 原始模型衬垫滑动距离

Figure 5 | Tibial insert slip distance of original model



图注: A 为衬垫表面滑动距离, 为 22.03 mm; B 为衬垫背面滑动距离, 滑动距离为 0.25 mm

图 6 | 优化模型衬垫滑动距离

Figure 6 | Tibial insert slip distance of optimization model

明衬垫磨损率主要受接触面积和载荷的影响, 在同等载荷 80 N 条件下, A 型衬垫的接触面积为 23.4 mm<sup>2</sup>, 接触应力为 3.4 MPa, 磨损率为 1.55×10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup>/m; B 型衬垫的接触面积为 10.2 mm<sup>2</sup>, 接触应力为 7.8 MPa, 磨损率为 0.78×10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup>/m。HEISEL 等<sup>[12]</sup> 对髌关节衬垫进行体内磨损测试, 结果表明 28 mm 股骨头产生的衬垫体积磨损为 15.8 mm<sup>3</sup>/年, 32 mm 股骨头产生的衬垫体积磨损为 21.7 mm<sup>3</sup>/年。球头直径越大接触面积越大, 活动度也越大, 产生的体积磨损量也越大。实验中运动导向型衬垫增加了接触面积, 降低了衬垫的接触应力, 增加了一定程度的体积磨损量, 与上述文献分析结果一致。

对于线性磨损, 原始模型的衬垫线性磨损深度为 4.38×10<sup>-5</sup> mm, 优化模型的衬垫线性磨损深度为 3.15×10<sup>-5</sup> mm, 优化模型的衬垫线性磨损深度降低了 28%。ASHRAF 等<sup>[13]</sup> 研究表明固定单髁的线性磨损为 0.15 mm/年, 活动单髁的线性磨损为 0.02 mm/年。KRETZER 等<sup>[14]</sup> 分别对活动单髁与固定单髁进行体外磨损实验, 测试结果表明: 活动型衬垫的磨损颗粒数为 336×10<sup>9</sup> 个/Mc, 固定型衬垫的磨损颗粒数为 263×10<sup>9</sup> 个/Mc。BURTON 等<sup>[15]</sup> 同样对活动单髁与固定单髁进行体外磨损实验, 测试结果表明: 活动型衬垫的体积磨损率为 16 mm<sup>3</sup>/Mc, 固定型衬垫的体积磨损率为 2.36 mm<sup>3</sup>/Mc。根据上述文献分析表明, 根据临床应用, 活动单髁衬垫的接触面积远大于固定单髁衬垫的接触面积, 接触面积的增加将显著降低衬垫的接触应力, 但是会增加衬垫的体积磨损率。固定单髁衬垫的接触面积小, 衬垫的接触应力远大于活动单髁衬垫的接触应力, 将显著增加固定单髁衬垫的线性磨损。利兹大学 HATTON 等<sup>[16]</sup> 的研究表明, 导

致骨溶解的聚乙烯磨粒阈值为 500–800 mm<sup>3</sup>。这些研究表明活动型单髁衬垫更容易发生体积磨损,当体积磨损阈值超过骨溶解阈值后易引发临床中的骨溶解,造成假体松动。固定型单髁衬垫则更容易发生线性磨损,当线性磨损超过一定程度易引发临床中衬垫磨穿,造成衬垫失效。由此可见,该文设计优化的固定型单髁衬垫可明显提高其线性磨损性能。

WILLING 等<sup>[6]</sup>通过对 CR 型人工膝关节假体的股骨髁与衬垫的关节面形状优化来降低磨损,并根据 ISO 标准进行了磨损仿真研究,结果表明优化后的假体可明显降低衬垫线性磨损。从数值模拟结果来看,该文对固定型单髁衬垫的摩擦面进行形状优化,可显著降低线性磨损与接触压力。

在下一步工作中可对股骨髁与衬垫的冠状面半径与矢状面半径进行参数研究,分析其不同组合方式对接触压与磨损量的影响规律。另外,高屈曲、上下楼梯等不同载荷条件,假体不同型号尺寸对磨损的影响也应在后续研究中考考虑。尽管这些对磨损可能造成的影响因素尚未考虑,但是通过衬垫形状优化来改善磨损性能是可行的方法,并且未来的分析将考虑多参数组合优化实现磨损性能的评估,以便更好地进行膝关节假体设计。

**结论:** 实验对单间室膝关节衬垫假体进行了优化设计,基于 Archard 磨损理论建立了单间室膝关节假体的磨损有限元模型,研究了衬垫优化前后的接触压力及磨损体积与线性磨损变化规律。通过对比衬垫在 ISO 标准步态载荷下的衬垫磨损发现,优化后的衬垫可明显提高线性磨损性能。该模型和方法可用于假体设计和临床中膝关节衬垫的磨损性能评估。

**作者贡献:** 王献抗进行实验设计,实验实施为张月静,实验评估为王献抗、刘军,资料收集为杨友,王献抗成文,刘军审核。

**经费支持:** 该文章接受了“天津市科技计划项目生物医学工程科技重大专项(18ZXSGSY00010)、第三批天津市人才发展特殊支持计划-高层次创新创业团队”的资助。所有作者声明,经费支持没有影响文章观点和对研究数据客观结果的统计分析及其报道。

**利益冲突:** 文章的全部作者声明,在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

**写作指南:** 该研究遵守国际医学期刊编辑委员会《学术研究实验与报告和医学期刊编辑与发表的推荐规范》。

**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] SUGGS JF, LI G, PARK SE, et al. Knee biomechanics after UKA and its relation to the ACL--a robotic investigation. *Orthop Res.* 2006;24: 588-594.
- [2] NEWMAN J, PYDISSETY RV, ACKROYD C. Unicompartmental or total knee replacement: the 15-year results of a prospective randomised controlled trial. *J Bone Joint Surg.* 2009;91:52-57.
- [3] O'DONNELL T, NEIL MJ. The Repicci II(R) unicondylar knee arthroplasty: 9-year survivorship and function. *J Clin Orthop Relat Res.* 2010;468: 3094-3102.
- [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 Biomech.* 2007;40(7):1550-1558.
- [5] TODO M, TAKAHASHI Y, NAGAMINE R. Computational Analysis of Stress Concentration and Wear for Tibial Insert of PS Type Knee Prosthesis under Deep Flexion Motion. *ICBME 2008, Proceedings 23:1559-1563,* 2009.
- [6] WILLING R, KIM ILY. Three dimensional shape optimization of total knee replacements for reduced wear. *J Medical and Bioengineering Application.* 2009;38:405-414.
- [7] 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.
- [8] 丁文字,马淑芹,周星辰,等. 高吻合度股胫关节面人工膝关节假体的磨损 [J]. *医用生物力学*, 2018,33(3):193-199.
- [9] SATHASIVAM S, WALKER PS. Computer model to predict subsurface damage in tibial inserts of total knees. *J Orthop Res.* 1998;16(5): 564-571.
- [10] BARBOUR PS, BARTON DC, FISHER J. The influence of stress conditions on the wear of UHMWPE for total joint replacements. *J Mater Sci Mater Med.* 1997;8(10):603-611.
- [11] NETTER J, HERMIDA JC, STEKLOV K, et al. Prediction of Wear in Crosslinked Polyethylene Unicompartmental Knee Arthroplasty. *J Lubricants.* 2015;3:381-393.
- [12] HEISEL C, SILVA M, DELA ROSA MA. Short-term in vivo wear of cross-linked polyethylene. *J Bone Joint Surg Am.* 2004;86-A(4):748.
- [13] ASHRAF T, NEWMAN JH, DESAI VV, et al. Polyethylene wear in a non-congruous unicompartmental knee replacement: a retrieval analysis. *Knee.* 2004;11(3):177-181.
- [14] KRETZER J P, JAKUBOWITZ E, REINDERS J, et al. Wear analysis of unicondylar mobile bearing and fixed bearing knee systems: A knee simulator study. *Acta Biomater.* 2011;7(2):710-715.
- [15] BURTON A, WILLIAMS S, BROCKETT C L, et al. In Vitro Comparison of Fixed- and Mobile Meniscal-Bearing Unicondylar Knee Arthroplasties. *J Arthroplasty.* 2012;27(8):1452-1459.
- [16] HATTON A, NEVELOS JE, Matthews JB, et al. Effects of clinically relevant alumina ceramic wear particles on TNF- $\alpha$  production by human peripheral blood mononuclear phagocytes. *Biomaterials.* 2003;24(7): 1193-1204.