DOI: 10.3901/JME.2021.21.202

交联超高分子量聚乙烯人工髋关节磨损仿真模拟^{*}

高子瑞 刘峰 刘瑶 焦朵朵 李宏伟
(中北大学机械工程学院 太原 030051)

摘要: 人工髋关节超高分子量聚乙烯(UHMWPE)关节面磨损仍是影响置换关节远期寿命的主要因素,其仿真建模是对关节模拟机磨损测试手段的重要补充,也是实现置换关节临床前性能评估的有效方法。由多向运动产生的交叉剪切效应是影响UHMWPE磨损的主要原因之一,也是仿真建模的关键。现有理论方法将磨损深度确定为滑动距离的函数,并将90°交叉剪切运动条件下的磨损作为度量基准计算不同角度下的交叉剪切效应,但尚未考虑接触应力变量对磨损深度的影响。针对以上问题,提出了在垂直交叉剪切运动条件下将磨损深度表示为摩擦功函数的方法。该方法利用UHMWPE摩擦因数与接触压力的定量关系计算摩擦因数并确定摩擦功,解决了UHMWPE磨损交叉剪切效应中滑动距离与接触应力的耦合问题。基于磨损仿真新模型研究了36 mm直径的交联UHMWPE髋关节,并与已有ProSim模拟机试验结果进行了验证。结果显示该仿真模型可准确计算体积磨损和线性磨损等磨损量以及髋关节载荷方向改变对磨损的影响。磨损新模型为进一步仿真模拟奠定了有效基础。

关键词: 超高分子量聚乙烯磨损; 人工髋关节; 交联

中图分类号: TH117

Computational Wear Simulation on Cross-linked Ultra-high Molecular Weight Polyethylene Artificial Hip Joints

GAO Zirui LIU Feng LIU Yao JIAO Duoduo LI Hongwei
(School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051)

Abstract: Wear of artificial hip joint bearing surfaces using ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) as material remains a major factor that affects the long-term performance of replacement joints. The computational wear modeling of hip joint bearings is an effective preclinical evaluation method that complements hip joint simulators for wear testing. The cross-shear effect resulting from multi-directional motion is one of the key factors that affect UHMWPE wear and critical to wear simulation modeling. The existing theoretical method quantifies the wear depth as a function of sliding distance and calculates the cross-shear effect of different angles based on the wear as a metric determined under the 90° cross-shear motion. However, the effect of contact stress variable on wear depth has been neglected. In these cases, a method of considering wear depth as a function of frictional work under the condition of 90° cross-shear motion is proposed. Taking account of the quantitative relationship between the friction coefficients and contact pressures of UHMWPE, the friction coefficients can be calculated and subsequently the frictional work. The method resolves the problem of coupling of sliding distance and contact stress in calculating cross-shear effect on UHMWPE wear. The wear of 36mm diameter cross-linked UHMWPE hip joint is computationally simulated based on the new wear model, and validated against the results of ProSim simulators previously published. The results show that the wear simulation model can be used to calculate volumetric wear rates and linear wear depths, and the effect of varied loading directions of artificial hip joint with marked accuracy. The new wear model has laid a solid foundation for further computational simulation.

Key words: ultra-high molecular weight polyethylene wear; artificial hip joint; crosslink

^{*} 2017年山西省百人计划高校创新、山西省高等学校科技创新(2019L0564)和先进制造技术山西省重点实验室开放基金(XJZZ201903)资助项目。
20201223收到初稿, 20210419收到修改稿

0 前言

人工关节置换是治疗病变或创伤性关节的有效手段。它的成功始于金属与超高分子量聚乙烯(UHMWPE)配伍的关节面设计,因具有低摩擦低磨损特性,其临床应用至今已有 60 年的历史,是骨科器械治疗最成功的技术^[1]。然而,人工髋关节表面因磨损而产生聚乙烯磨屑,可引起关节周围组织不良生物反应,造成无菌松动和骨溶解,最终导致关节固定失效,其根源是关节组件及其骨固定表界面的生物和摩擦学问题^[2]。其中,关节面磨损是制约置换关节远期寿命的主要原因,人工关节的磨损研究始终是其设计的重要课题。

人工髋关节可采用更耐磨的材料,例如钴铬钼合金和氧化铝生物陶瓷。以钴铬钼合金为关节面的金属与金属配副设计已在临床应用,虽然其磨损量可比聚乙烯材料降低两个数量级以上,但其磨损可产生毒性金属离子,严重影响了其使用寿命^[3]。陶瓷与陶瓷配伍髋关节具有更低的磨损率,但陶瓷髋关节可出现碎裂、难加工、容错性不佳等问题,使其临床应用受到限制^[4]。作为替代材料,交联 UHMWPE 是聚乙烯经 γ 射线辐照后的改性材料,其磨损显著降低,但其抗疲劳性能随辐照增加而减弱,同时产生的自由基可使聚乙烯更易氧化而影响力学性能。交联 UHMWPE 髋关节虽已成为目前临床应用的主要形式,但其长期性能仍待进一步验证^[5]。随着人口老龄化及寿命预期的大幅提升,以及患者对关节运动量要求不断提高,对人工关节的生物摩擦学性能提出了更高要求,这就需要对 UHMWPE 人工关节进行更加系统的磨损模拟与测试,为设计提供理论依据^[6]。

聚乙烯关节磨损研究主要有试验手段,包括销盘摩擦磨损^[7]和关节模拟机磨损测试^[8],前者用于摩擦学变量研究,后者则用于设计后期的整体性能评估。但人工关节磨损量极低,模拟测试周期长、不适于大量的设计参数研究,而计算机仿真是试验手段的必要补充。聚乙烯髋关节在边界摩擦条件下的磨损为黏着、磨料和疲劳形式的组合^[9],置换关节失效与聚乙烯磨损量成正相关^[10],因此对磨损进行定量分析能更好地揭示机理,是国内外研究需要解决的难题。聚乙烯分子为线性长链,单向滑动下磨损极低,多向交叉运

动下的磨损可增大 2 个数量级,WANG 等^[11]将这一现象定义为交叉剪切效应,它是决定磨损的关键因素^[12]。磨损的建模仿真适于进行定量计算^[13],磨损定律以试验为基础建立公式,常用的有 Archard 公式,适用于金属关节^[14]。对于聚乙烯关节,MAZZUCCO 等^[15]发现其磨损与接触面积成正比,SAIKKO 等^[16]测得了摩擦因数与接触应力的函数关系。LIU 等^[17]建立了基于面积和交叉剪切的磨损公式,然而该公式交叉剪切率中定义的接触应力因比值而抵消,只反映交叉剪切方向特性的平均效应,不能准确度量实际滑动距离大小的影响,该方法对磨损量计算的结果低于试验^[18-19]。STRICKLAND 等^[20]提出了等距离 90°交叉剪切度量概念,研究了不同滑动距离的磨损,发现磨损率在交叉开始时高,随距离增加而降低,得出了垂直交叉剪切条件下磨损与滑动距离的关系。但该方法仍局限于解决相对运动关系,没有考虑应力变化。

本研究提出将磨损作为交叉剪切和接触应力耦合的显性函数的计算方法,在 Strickland 计算框架上,以摩擦功取代单一滑动位移,利用聚乙烯接触应力与摩擦因数的函数关系,确定摩擦功为接触应力和滑动位移的函数,建立将应力与位移耦合的磨损新公式,提出聚乙烯关节磨损仿真新模型,并应用于交联 UHMWPE 髋关节磨损模拟。通过与髋关节模拟机试验测试结果对比验证磨损模型,为聚乙烯髋关节设计的磨损性能研究奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 UHMWPE 人工髋关节磨损计算模型概述

本文选取股骨头直径尺寸较大的 36 mm 髋关节为研究对象。大头设计(>28 mm)符合关节运动稳定性要求,但大尺寸设计可能增大聚乙烯磨损,是磨损研究的重点^[21]。此外鉴于 γ 射线辐照可影响聚乙烯疲劳性能,本研究选取了辐照量较低的强生公司 Marathon 聚乙烯臼杯(GUR1050, 5 Mrad γ 辐照, 120°退火处理),与其配伍的球头为钴铬钼合金(CoCrMo)。如图 1 所示,髋关节结构为球对球窝形式,臼杯倾角为相对于 X 轴的夹角,坐标系 X, Y 和 Z 正向分别对应人体解剖学外、上和后侧。关节运动主要角位移规定为:绕 X 轴正向转动为屈曲,绕 Y 轴正向转动为内旋。

图 1 髋关节(右侧髋)球对球窝简化几何模型

臼杯由聚乙烯内衬和金属外壳组成, 为 180° 半球形。聚乙烯内衬均匀厚度 6 mm, 钛合金外壳厚度 3 mm, 其外侧粗糙多孔结构可形成骨长上固定。钛壳与聚乙烯内衬配合无相对运动, 球头与臼杯之间的半径间隙为 0.5 mm。为降低磨粒磨损, 金属球头和聚乙烯臼杯表面粗糙度分别小于 10 nm 和 $1\ \mu\text{m}$ 。

考虑普通患者日常主要步态活动, 选取了髋关节步态运动和载荷条件^[21], 同时假设关节处于理想的标准安放位置, 不考虑边缘接触等不良加载情况^[22]。为了与已发表的试验结果进行验证, 分别选取了 ProSim 电动和气动两种髋关节模拟机试验条件^[21]作为磨损仿真模型的输入条件。如图 1 所示考虑主要的屈曲/伸展和内/外旋运动, 其角位移幅值如图 2 所示, 范围分别为 30° / -15° 和 10° / -10° , 关节接触力峰值 3 kN, 摆动阶段为 0.3 kN, 满足 ISO 14242-1:2014 标准^[23]推荐范围。

电动模拟机载荷方向始终垂直, 屈曲伸展(FE)和内外旋(IER)运动加于球头(其欧拉角顺序 FE $\rightarrow$ IER); 气动模拟机的 FE 和 IER 运动分别加于球头和臼杯, 载荷加于球头中心, 其方向随球头 FE 运动在关节矢状面内改变。臼杯只设外倾角(冠状面内), 分别为 30° 和 35° , 使关节力方向相对于臼杯外侧边缘角度分别为 60° 和 55° 。

图 2 ProSim 髋关节磨损模拟机步态周期载荷与运动条件

1.2 有限元接触力学模型

在 Abaqus 软件环境下创建髋臼组件和股骨头关节面的有限元接触力学模型, 如图 3 所示。

图 3 人工髋关节有限元接触力学模型

髋臼组件均采用 8 节点线性立方体单元 (C3D8), 关节面接触区有限元数值收敛后的单元边长为 1.0 mm。聚乙烯臼杯和钛合金外壳的弹性模量分别为 460 MPa 和 110 GPa, 泊松比为 0.4 和 0.3, 同时考虑聚乙烯材料塑性变形参数^[19]。聚乙烯内衬与钛合金壳之间完全固定, 壳外侧采用固定约束。由于钴铬钼合金球头的变形相对于聚乙烯内衬可以忽略, 因此将球头定义为刚性表面(rigid)。将一个步态周期(1 s)划分为 16 个不同瞬时点, 在不同瞬时采用准静态接触力学求解模式。球头与臼杯关节面之间设为面与面接触, 球头只能沿关节力加载方向平动, 其转动自由度被完全限制。最后求解聚乙烯臼杯关节面上各节点的接触压力, 同时计算各个瞬时球头相对于聚乙烯关节面单元节点的滑动位移矢量。

1.3 UHMWPE 磨损公式

聚乙烯表面相对滑移在交叉剪切角度为 90° 时的磨损是任意交叉剪切角度滑移下磨损计算的度量基准^[20], 任意角度交叉滑动位移磨损的计算采用瞬时滑动位移对应的线性磨损深度公式。考虑单位面积磨损深度如下

$$W_d = K_M \cdot f(CS) \cdot f(F_w) \quad (1)$$

式中, K_M 是磨损因子(磨损深度常数); $f(F_w)$ 为 90° 交叉剪切下的摩擦功函数; $f(CS)$ 为任意交叉剪切角度滑动位移的交叉剪切函数。

1.3.1 等距离 90° 交叉剪切摩擦功函数 $f(F_w)$

本研究采用强生公司 5 Mrad 交联 UHMWPE 销盘磨损试验结果^[20], 该试验材料与强生公司髋关节模拟机测试材料匹配。在此试验数据基础上, 建立等距离 90° 交叉剪切条件下交联 UHMWPE 磨损深

度与滑动摩擦功的函数关系, 如图 4 所示。

图 4 5 Mrad γ 辐照交联 UHMWPE 销在 90° 交叉剪切磨损试验下磨损深度与聚乙烯滑动摩擦功的函数关系

图 4 中切线代表初始磨损率 K_M / F_{wc} , 其中参数 F_{wc} 是临界摩擦功, 对应于初始磨损率(图 4 中的切线)与最大磨损深度 K_M 交点的横坐标。由试验点(圆形标记)拟合出摩擦功函数 $f(F_w)$ 。考虑摩擦因数 η 与接触应力 P 之间的函数关系^[24]

$$\eta = 0.18(P / P_0)^{-5/6} \quad (2)$$

取 $P_0 = 1$ MPa, 对应应力无量纲化。单位面积摩擦功

$$F_w = 0.18P^{1/6}L \quad (3)$$

式中, L 为滑动距离, 以摩擦功为变量拟合 90° 交叉摩擦功函数

$$f(F_w) = 1 - e^{(-F_w / F_{wc})} \quad (4)$$

根据 DRESSLER^[25]试验中接触压力 4.7 MPa 对应数据, 得 5 Mrad 交联 UHMWPE 的临界摩擦功 F_{wc} 和最大磨损深度 K_M 分别为 $F_{wc} = 0.35$ N·mm, $K_M = 18.2$ pm。

1.3.2 滑动位移的极化及极化强度因子定义

如图 5a 所示, 如果所有位移矢量都沿 90° 方向, 呈完全极化, 则只需一个极化矢量表示 ($\mu = 1, \varphi = 90^\circ$), μ 为极化强度因子, φ 是矢量方向角; 如果位移矢量沿不同方向, 如图 5b 所示, 则呈较强非极化, 需不同的极化矢量 (μ_i, φ_i) 表征。

(a) 完全极化, 无交叉剪切效应 (b) 非极化, 有交叉剪切效应

图 5 UHMWPE 交叉剪切效应磨损极化现象矢量示意图

极化因子 μ_i 恒小于 1, 其和恒等于 1, 极化矢量用于计算任意滑动位移的交叉剪切函数 $f(CS)$ ^[20]。

1.3.3 任意滑动位移的交叉剪切函数 $f(CS)$ 与极化因子 μ_i 计算

如图 6 所示, 对于某瞬时滑动位移 d_{r_n} 与角度 θ , 给定其余已知的瞬时滑动位移 d_{r_i} 、角度 ϕ_i 和极化因子 $\mu_i (i = 1, n-1)$ 。

图 6 聚乙烯表面材料点和与其固定的材料坐标轴

则位移 d_{r_n} 的交叉剪切函数

$$f(CS) = \sum_i (\mu_i \cdot \sin^2(\theta - \phi_i)) \quad (5)$$

任意滑动位移 d_{r_i} 对应的极化因子 μ_i 通过递归法计算, 按运动周期内位移发生的时间顺序依次进行

$$\mu_i = W_d / W_p \quad (6)$$

式中, W_d 为瞬时磨损深度(式 1), W_p 为瞬时磨损深度极限

$$W_p = K_M \cdot \zeta \quad (7)$$

ζ 是递归计算当前瞬时的交叉剪切函数

$$\zeta = \sum_i (\mu_i \cdot \sin^2(\theta - \phi_i)) \quad (8)$$

在当前瞬时, λ 是极化因子中间变量

$$\lambda = W_d / W_p = f(F_w) \quad (9)$$

对所有已有位移矢量的极化因子进行比例调整 $\mu_i = \mu_i \cdot (1 - \lambda)$ 。如果当前位移矢量 d_{r_i} 与其他已有位移矢量不共线, 则 $\mu_i = \lambda$; 如果位移矢量 d_{r_i} 与已有位移矢量共线, 则进行合并及将极化因子相加 $\mu_i = \mu_i + \lambda$, 对所有位移重复上述递归过程, 直至完成周期内最后一个瞬时^[20]。

1.3.4 体积磨损量公式

基于接触面积的磨损体积公式如下

$$V = K_M \cdot f(CS) \cdot f(F_w) \cdot A \cdot N \quad (10)$$

式中, $f(CS)$ 为交叉剪切函数; $f(F_w)$ 为摩擦功函数; A 为接触面积; N 为加载周期个数。

1.4 UHMWPE 蠕变模型

目前文献中尚未有不同交联量聚乙烯蠕变性能的具体数据结果, 辐照交联后的聚乙烯蠕变会减小, 但考虑本文研究的 5 Mrad 交联量较低, 本文选取非交联 UHMWPE 轴向加载蠕变试验数据作为近似, 蠕变公式可表示为应变相对于时间的对数函数^[26]

$$\delta_c = [C_1 + C_2 (\lg(t) - 4) p_{av} h] \quad (11)$$

式中, 常数 $C_1 = 3.49 \times 10^{-3}$, $C_2 = 7.97 \times 10^{-4}$; 时间 t 的单位为分钟; p_{av} 为加载历史全程的平均压力, 单位为 MPa, h 为聚乙烯臼杯厚度, 单位为 mm。对拟设定的周期全程, 聚乙烯关节面上单个节点蠕变计算关于时间的离散形式如下

$$\delta_c = \left\{ C_1 + C_2 \left[\lg \left(\sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \sum_{j=1}^m N_j \right) - 4 \right] \right\} \times \frac{\sum_{j=1}^m N_j \left(\sum_{i=1}^n p_i / n \right)_j h}{\sum_{j=1}^m N_j} \quad (12)$$

其中 n 为单个步态周期离散后所包含的瞬时数。在磨损与蠕变的累积计算过程中, 需对聚乙烯臼杯表面的几何尺寸(表面节点坐标)进行相应修改。几何更新无需按单个步态周期进行, 可设置一定的步态周期数作为线性磨损深度的放大因子, 而假设几何更新对此时间间隔内的磨损和蠕变不产生显著影响。 N_j 为几何尺寸更新时间间隔内的步态周期数, 本文选择 62 500, 可实现磨损在数值上达到收敛; m 为整个磨损模拟过程所含的几何更新间隔次数; p_i 为单个步态周期内的瞬时接触压力。上述公式包含了加卸载过程中蠕变变形恢复效应。

仿真磨损模拟通过 Fortran 语言程序建立计算流程, 程序调用 Abaqus 有限元接触力学模型求解聚乙烯臼杯关节面节点的接触压力。由于模拟 5 百万周期产生的最大表面穿透深度小于 0.5 mm, 几何更新只对表面单层节点坐标沿法向做较小修改, 不会影响接触力学结果准确性。完整计算流程如图 7 所示。

图 7 仿真磨损模拟流程图

2 结果

经磨损仿真模拟计算, 在 5 百万步态周期内, 36 mm 直径 5 Mrad 交联 UHMWPE 髋关节臼杯关节面在 ProSim 电动模拟机载荷/运动条件下的表面体积改变如图 8 所示, 包括磨损和蠕变。

图 8 5 百万周期仿真模型交联 UHMWPE 臼杯表面体积随时间周期变化趋势

总体积改变和磨损体积分别作为时间的函数随周期增加而近似线性增加, 蠕变在 1 百万周期后基本保持常数不变。相对于 1~5 百万周期, 第

1 百万周期的总体积改变较大(34.7 mm^3 , 斜率大于 $1 \sim 5$ 百万周期曲线), 这是由于聚乙烯表面初始产生的蠕变较大(26.9 mm^3), 占总体积改变的 80%, 而磨损较小(7.8 mm^3 占 20%)。在随后的 $1 \sim 5$ 百万周期内的体积改变主要来自聚乙烯磨损, 此仿真结果显示出的变化趋势与髋关节模拟机试验结果吻合^[21]。

模拟机试验^[21]中电动和气动模拟机分别采用 6 个与 4 个工位进行试验。在 ProSim 电动和气动两种模拟机不同加载条件下, 本文仿真模型计算所得 5 百万周期内的平均磨损体积分别为 14.4 mm^3 和 9.5 mm^3 。如图 9 所示, 仿真结果与试验中相应的结果 $14.6 \text{ mm}^3 \pm 1.0 \text{ mm}^3$ 和 $8.9 \text{ mm}^3 \pm 2.7 \text{ mm}^3$ 具有很好的吻合度。

图 9 5 百万周期交联 UHMWPE 臼杯平均磨损体积仿真模型与模拟机试验测试结果对比

模拟机试验表明在 ProSim 电动模拟机条件下的磨损体积较气动模拟机高 39%，两种模拟机所得磨损体积结果具有显著差异，本仿真的相应结果为 34%，显示出本研究中的磨损模型的准确性。为进一步验证仿真结果，如图 10 所示，在 ProSim 电动模拟机条件和 5 百万标准步态周期条件下，对比了仿真模型和模拟机试验中聚乙烯关节面上线性穿透深度(包括磨损和蠕变)的分布。

图 10 5 百万周期仿真模型和模拟机试验交联 UHMWPE 臼杯总穿透深度在关节面上分布结果对比

由图 10 可见臼杯表面的总穿透深度主要分布

在上外侧，沿前后方向对称，磨损深度值和分布范围与试验测量结果具有很好的一致性。基于有限元模型，可求得 5 百万周期最大线性深度值约为 0.3 mm ；面积大约 686 mm^2 ，占臼杯半球面总面积 2036 mm^2 的 30%。

如图 11 所示，对比了两种模拟机条件下的仿真模拟磨损深度在臼杯表面的分布。电动模拟机条件产生的磨损以关节力载荷作用点为中心呈圆形分布，而气动模拟机条件产生的最大磨损在臼杯表面上沿前后方向有偏移，磨损区分布的前后向尺寸较大，此特征与气动模拟机关节力载荷方向随球头在矢状面内沿前后向倾斜作用相吻合，其面积为 613 mm^2 ，比电动模拟机条件下小 11%，最大深度小 30% (0.2 mm 与 0.14 mm)。如图 12 所示，两种模拟机产生的最大线性磨损深度均表现出随时间周期成线性增加的关系，电动模拟机产生的最大磨损深度高于气动模拟机^[21]。

图 11 5 百万周期仿真模型交联 UHMWPE 臼杯磨损深度在关节面上分布结果对比

图 12 5 百万周期仿真模型交联 UHMWPE 臼杯最大线性磨损深度随时间周期变化趋势对比

图 13 进一步对比了在两种模拟机条件下的全程历史平均接触压力在臼杯表面的分布。由图可知，分布差异较明显，气动模拟机条件下的接触压力分布的梯度较大；从总体看，接触压力因表面磨损而明显减小，最大平均接触压力分别为 4.5 MPa 和 6.8 MPa ，明显小于未磨损表面的接触压力 15 MPa 。

图 13 5 百万周期仿真模型交联 UHMWPE 臼杯平均接触应力分布对比

3 讨论

人工髋关节超高分子量聚乙烯关节面磨损仍是影响置换关节远期寿命的主要因素, 目前临床认可的置换关节成功率为 90% 存活 15 年以上^[9,27], 这对于 65 岁以上患者可基本满足要求, 但对于年轻或多活动量患者而言仍存在关节失效的风险。交联 UHMWPE 可使磨损减少 50% 以上^[9], 为延长人工髋关节寿命提供了条件, 但交联处理可影响聚乙烯抗疲劳性能。聚乙烯还存在氧化问题^[28], 随着人类寿命将延长至 100 岁^[29], 以及大活动量要求的增加, 对交联 UHMWPE 髋关节的磨损性能评估、验证以及设计提出了更高要求^[9]。髋关节磨损的仿真模拟有利于揭示机理和提高设计效率, 但其模型建立尚不能基于第一性原理, 仿真模拟仍需在试验基础上通过研究摩擦学主要参数对磨损产生的影响, 建立相应的物理模型和数学计算公式, 准确的预测模型仍是目前研究的难题^[30]。

影响交联 UHMWPE 磨损的核心要素包括接触面积、运动的交叉剪切效应和接触应力。通过建立基于接触面积的磨损公式, 以及对交叉剪切效应的度量, 结合有限元模型计算接触力学, 仿真模型可预测聚乙烯髋关节表面磨损的主要变化趋势, 例如髋关节的多向运动效应、关节直径尺寸、表面间隙影响等^[19], 但在磨损量的数值计算上仍存在约 50% 的误差^[17], 表明仿真模型没有完全和准确反映磨损机理, 其中一个主要原因是在交叉剪切度量中没有准确计算接触应力的影响^[20]。传统计算方法虽提出计算摩擦功比值来度量交叉剪切效应, 但没有考虑磨损率随交叉剪切距离的变化, 没有考虑摩擦因数与接触应力的关系。本研究提出了将磨损率随距离变化关系和磨损是摩擦功显性函数关系相结合的方法, 将摩擦因数与应力的关系引入摩擦功公式, 解决了交叉剪切中滑动距离与接触应力耦合的度量问

题, 准确量化表征了接触应力的影响。

通过对 36 mm 直径 5 Mrad 交联 UHMWPE 髋臼杯分别在电动、气动模拟机测试条件下进行磨损仿真计算, 仿真结果与模拟机试验^[21]结果对比, 仿真模型能够准确计算聚乙烯关节表面磨损体积和蠕变(图 8~10)。臼杯关节面体积改变随时间周期成近似线性增加的变化趋势(图 8), 这与临床和模拟机结果一致, 即第 1 个百万周期内主要产生蠕变(80%), 之后蠕变保持不变, 磨损体积线性增加。仿真计算所得的磨损体积误差为 1.3% 和 7% (图 9), 较传统计算方法(误差 50%)有了显著提高。仿真磨损与蠕变在空间分布结果上也与试验具有良好一致性(图 10), 显示出新磨损模型的准确性和有效性。利用仿真模型进行 5 百万周期模拟计算仅需 15 小时, 而模拟机模拟则需 2 个月以上, 仿真计算极大提高了效率, 为髋关节设计的参数研究及长期性能预测提供了必要条件。

通过对髋关节模拟机的不同输入条件进行仿真模拟对比, 进一步验证了新磨损公式(图 9)。同时结果显示, 髋关节载荷力作用方向改变使磨损减小, 例如与固定方向载荷力相比, 磨损体积和最大线性深度分别降低 39% (图 9, 11) 和 28% (图 12)。仿真结果显示, 固定载荷方向下的接触应力较低, 接触面积较大(图 13), 磨损与接触应力成反比, 与接触面积成正相关; 另一方面, 载荷方向改变条件下的接触应力较大(图 13), 接触面积减小, 对应磨损较低。不同条件下磨损的这一差异反映了交叉剪切运动与接触应力耦合效应的复杂性, 表明磨损预测已不能简单地通过单一变量进行比较, 应该进行完整的模拟与计算。模拟机测试无法获得关节表面接触应力数据, 参数研究需更多的运行时间, 需要仿真模拟作为必要补充。

4 结论

(1) 提出交联 UHMWPE 仿真新模型和模拟方法, 可准确计算在模拟步态条件下的髋关节聚乙烯关节面磨损。

(2) 交联 UHMWPE 磨损可通过建立 90° 交叉运动条件下磨损和摩擦功的函数关系来进行准确度量, 摩擦功计算需考虑摩擦因数与接触应力的关系。

(3) 磨损新模型能准确计算载荷方向改变对磨损的影响。

本文在摩擦功的测定方面仍需进一步扩展。目前只参考了 4.7 MPa 接触压力下的销盘磨损试验,

此值与本文所计算的髋关节平均最大接触压力接近(4.5~6.8 MPa)。髋关节接触压力与关节尺寸和结构设计相关,可在较大范围变化,应当考虑扩大的应用范围。对于不同模拟机不同输入条件和临床患者不同生理条件等其他条件,应进行更多的数据验证。依据新模型对髋关节几何结构进行设计、研究关节不同生理功能条件对磨损的影响以提供临床相关设计指导是下一步研究的重点。

参 考 文 献

- [1] PIERANGIOLA B, ANUJ B, ALESSANDRO B, et al. Ultra-high molecular weight polyethylene: Influence of the chemical, physical and mechanical properties on the wear behavior. a review[J]. *Materials*, 2017, 10(7): 791.
- [2] INGHAM E, FISHER J. Biological reactions to wear debris in total joint replacement[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part H Journal of Engineering in Medicine*, 2000, 214(1): 21-37.
- [3] LIU F, LIAN C, FENG L, et al. The effect of femoral head size on edge loading in metal-on-metal hip joint replacement under dynamic separation conditions[J]. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 2020, 108(5): 1897-1906.
- [4] LIU F, FENG L, WANG J. A computational parametric study on edge loading in ceramic-on-ceramic total hip joint replacements[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2018, 83: 135-142.
- [5] KURTZ S, MEDEL F J, MANLEY M. (iii) Wear in highly crosslinked polyethylenes[J]. *Current Orthopaedics*, 2008, 22(6): 392-399.
- [6] FISHER J. A stratified approach to pre-clinical tribological evaluation of joint replacements representing a wider range of clinical conditions advancing beyond the current standard[J]. *Faraday Discussions*, 2012, 156: 59-68.
- [7] BAYKAL D, SISKEY R S, HAIDER H, et al. Advances in tribological testing of artificial joint biomaterials using multidirectional pin-on-disk testers[J]. *Journal of The Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2014, 31: 117-134.
- [8] FISHER J, AL-HAJJAR M, WILLIAMS S, et al. In vitro measurement of wear in joint replacements: A stratified approach for enhanced reliability "SAFER" pre-clinical simulation testing[C]//*Seminars in arthroplasty*. WB Saunders, 2012, 23(4): 286-288.
- [9] 王成焱, 靳忠民, 廖广姗, 等. 人工髋关节磨损分析和临床失效诊断推理[J]. *医用生物力学*, 2012, 27(4): 361-368.
- WANG Chengtao, JIN Zhongmin, LIAO Guangshan, et al. Artificial hip joint wear analysis and clinical failure diagnosis reasoning[J]. *Medical Biomechanics*, 2012, 27(4): 361-368.
- [10] REINHARD E, RIEKER C B. Estimating the osteolysis-free life of a total hip prosthesis depending on the linear wear rate and head size[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 2018, 232(8): 753-758.
- [11] WANG A. A unified theory of wear for ultra-high molecular weight polyethylene in multi-directional sliding[J]. *Wear*, 2001, 248(1-2): 38-47.
- [12] WANG A, LEE R, HERRERA L, et al. Modeling and verification of ultra-high molecular weight polyethylene wear in multi-directional sliding[J]. *Wear*, 2013, 301(1-2): 162-167.
- [13] PATTEN E W, VAN CITTERS D, RIES M D, et al. Wear of UHMWPE from sliding, rolling, and rotation in a multidirectional tribo-system[J]. *Wear*, 2013, 304(1-2): 60-66.
- [14] LIU F, LESLIE I, WILLIAMS S, et al. Development of computational wear simulation of metal-on-metal hip resurfacing replacements[J]. *Journal of Biomechanics*, 2008, 41(3): 686-694.
- [15] MAZZUCCO D, SPECTOR M. Effects of contact area and stress on the volumetric wear of ultrahigh molecular weight polyethylene[J]. *Wear*, 2003, 254(5-6): 514-522.
- [16] SAIKKO V. Effect of contact pressure on wear and friction of ultra-high molecular weight polyethylene in multidirectional sliding[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 2006, 220(7): 723-731.
- [17] LIU F, GALVIN A, JIN Z, et al. A new formulation for the prediction of polyethylene wear in artificial hip joints[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 2011, 225(1): 16-24.
- [18] LIU F, FISHER J, JIN Z. Computational modelling of polyethylene wear and creep in total hip joint replacements: Effect of the bearing clearance and diameter[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2012, 226(6): 552-563.
- [19] LIU F, FISHER J, JIN Z. Effect of motion inputs on the wear prediction of artificial hip joints[J]. *Tribology International*, 2013, 63: 105-114.
- [20] STRICKLAND M A, DRESSLER M R, 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.
- [21] ALI M, AL-HAJJAR M, PARTRIDGE S, et al. Influence of hip joint simulator design and mechanics on the wear and creep of metal-on-polyethylene bearings[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 2016, 230(5): 389-397.
- [22] LIU F, FISHER J. Effect of an edge at cup rim on contact stress during micro-separation in ceramic-on-ceramic hip joints[J]. *Tribology International*, 2017, 113: 323-329.
- [23] International Organization for Standardization. ISO 14242-1:2014 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]. 2014.
- [24] SAIKKO V. Effect of contact area on the wear and friction of UHMWPE in circular translation pin-on-disk tests[J]. *Journal of Tribology*, 2017, 139(6): 061606.
- [25] DRESSLER M R, STRICKLAND M A, TAYLOR M, et al. Predicting wear of UHMWPE: Decreasing wear rate following a change in direction[J]. *Wear*, 2011, 271(11-12): 2879-2883.
- [26] ZHAO D, SAKODA H, SAWYER W G, et al. Predicting knee replacement damage in a simulator machine using a computational model with a consistent wear factor[J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2008, 130(1): 011004.
- [27] EVANS J T, EVANS J P, WALKER R W, et al. How long does a hip replacement last? A systematic review and meta-analysis of case series and national registry reports with more than 15 years of follow-up[J]. *The Lancet*, 2019, 393(10172): 647-654.
- [28] ORAL E, WANNOMAE K K, BICHARA D A, et al. An antioxidant stabilized, chemically cross-linked UHMWPE with superior toughness[J]. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 2019, 107(6): 1945-1952.
- [29] JENNINGS L M, AL-HAJJAR M, BROCKETT C L, et al. (iv) Enhancing the safety and reliability of joint replacement implants[J]. *Elsevier Sponsored Documents*, 2012, 26(4): 246-252.
- [30] PETRELLA A J, ARMSTRONG J R, LAZ P J, et al. A novel cross-shear metric for application in computer simulation of ultra-high molecular weight polyethylene wear[J]. *Computer Methods in Biomechanics & Biomedical Engineering*, 2012, 15(10-12): 1223-1232.
-
- 作者简介: 高子瑞, 女, 1995 年出生。主要研究方向为生物摩擦学。
E-mail: s1902008@st.nuc.edu.cn
- 刘峰, 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为人工关节设计、生物摩擦学、生物力学。
E-mail: fengliu@nuc.edu.cn
- 刘瑶(通信作者), 男, 1990 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为生物医学制造与精密加工技术。
E-mail: liuyao@nuc.edu.cn