

文章编号:1004-7220(2011)05-0448-06

金属对金属人工髋关节的磨损预测

胡铮铭¹, 王元培¹, 田波², 程倩¹, 赵三星¹, 王凤才^{1,3}

(1. 武汉科技大学,机械工程学院,武汉 430081;2. 瓦轴集团公司,大连 116300;3. 西安交通大学 机械工程学院,西安 710049)

摘要: 目的 发展复杂动态载荷与瞬态运动条件下的球面共型接触硬对硬人工髋关节的磨损预测模型,并用于典型的金属对金属人工髋关节在复杂三维生理运动条件下的磨损预测研究。**方法** 建立有限元模型用于接触力学问题求解,采用固定-跟踪法(fixed-tracked method)完成具有三维欧拉运动的人工髋关节双侧界面动态磨损几何再现及相应的接触与磨损问题模拟的数值交换。**结果** 磨损预测表明,磨损导致金属对金属人工髋关节接触界面几何由球面向非球面过渡,接触区域随磨损周期而增大,接触压力变化趋于平缓、最大接触压力逐渐减小。**结论** 本研究所发展的三维复杂动态、具有双侧界面几何磨损变化的人工髋关节磨损预测模型,能够很好地进行金属对金属髋关节磨损数值预测模拟实验,为认识人工髋关节磨损机理提供了新的方法。

关键词: 人工髋关节; 金属对金属; 三维欧拉运动; 固定-跟踪法; 磨损预测; 模拟; 有限元方法**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

Wear prediction for metal-on-metal hip joint replacements

HU Zheng-ming¹, WANG Yuan-pei¹, TIAN Bo², CHENG Qian¹, ZHAO San-xing¹, WANG Feng-cai^{1,3} (1. School of Mechanical Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Wafangdian Bearing Group Corporation (ZWZ), Dalian 116300, China; 3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract; Objective To develop a wear prediction model for hard-on-hard hip joint replacement under the condition of complex dynamic loading and time-dependent motion, and to apply it to the study on wear prediction of the typical metal-on-metal hip joint replacement in the complicated three-dimensional (3D) physiological motion condition. **Methods** The finite element model for contact mechanics was established and the fixed-tracked method was adopted to make the dynamic wear reappear on the bearing surface of artificial hip joint with 3D Euler transformation, and the data communication about the corresponding contact and wear for simulation was also made. **Results** The wear prediction test showed that the spherical bearing geometry of the artificial hip joint gradually became the non-spherical form due to the wear with time; meanwhile, the corresponding contact area was increased, the distribution of the contact pressure tended to be flattened, and the maximum contact pressure was decreased. **Conclusions** The wear prediction model developed here for metal-on-metal hip joint replacements with bilateral bearing surfaces under the condition of complex dynamic loading and motion could be used to carry out simulation test for the wear prediction of metal-on-metal artificial joint, which provides a new method to understand the wear mechanism of hip joint replacement.

Key words: Artificial hip joint; Metal-on-metal; 3D Euler transformation; Fixed-tracked method (FTM); Wear prediction; Simulation; Finite element method

由于外伤或病变原因,全球每年有超过 100 万人通过外科手术植入人工髋关节,用以代替自然关

节^[1]。近年来,国内人工关节的需求量也在不断扩大,年增长率约为 25%^[2-4]。人们希望人工关节能

收稿日期:2011-03-22; 修回日期:2011-04-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10972165),国家重点基础研究计划(973)项目(2011CB706601)。

通讯作者:王凤才,教授,博士研究生导师,E-mail:f. c. wang@wust. edu. cn。

够像自然关节一样工作;但事实上,人工髋关节使用中产生的磨损颗粒会引起生物组织反应,造成骨溶解等不良后果,始终是影响其正常使用的重要因素之一。此外,金属对金属人工髋关节相比聚合物关节具有更低的磨损率,近年来临床使用愈发广泛^[1]。

人工髋关节由人工股骨头、人工髋臼、关节柄和关节髋臼内衬等组成,其研究通常包括试验研究和理论模拟。由于试验研究需要价格昂贵的专用设备及辅助材料,且运行费用高、周期长,一些机理性问题还难以得到有效认识^[1,4],因此,近年来全数值模拟方法被广泛用于人工髋关节接触力学与磨损预测问题研究。例如,Maxian 等^[5]采用有限元模型研究了聚合物对钢材料组合、具有单侧几何磨损变化的人工髋关节磨损预测问题;张玉朵等^[7]模拟了人工髋关节的一个完整步态的接触压力,但每一个瞬态的载荷必须做一个有限元模型,这就无法连续地模拟人的一个步态的接触压力。此外,理论和实验表明,人工髋关节一般工作在混合润滑条件下,即伴随着流体膜润滑和边界润滑接触同时发生的一种润滑状态,因此磨损同时发生在人工髋关节股骨头和髋臼的两个接触表面^[2]。要开展硬对硬人工髋关节数值磨损预测问题,就需要处理复杂运动下的磨损几何再现及数值信息交换问题。近年来,在具有动态几何界面模拟问题方面一个重要的进展,是提出了所谓的固定-跟踪法(fixed-tracked method, FTM),即一种可用于复杂动态摩擦学数值模拟方法,这种方法已被用于解决非球面人工髋关节的瞬态弹流润滑问题^[1-2]。尽管人工髋关节球面共型接触动态接触力学和磨损预测问题的研究也有采用这种方法的报道,但文献[6]中未给出用于钢对钢磨损预测的具体模型与方法。由于计算效率问题,在用于磨损预测问题中,采用的网格密度较低且计算时间较长^[6]。

本文研究目的是要发展球面共型接触金属对金属人工髋关节在复杂动态载荷与瞬态运动条件下的磨损预测模型,建立有限元法用于接触问题求解,采用固定-跟踪法解决复杂动态双侧磨损界面再现和相应的数值交换问题,通过数值实验试图采用较高密度的有限元网格密度,进行复杂三维生理运动条件下的动态接触问题计算与进一步的磨损预测研究。

2 模型与方法

2.1 人工髋关节模型

典型的金属对金属人工髋关节被用来研究磨损预测问题,其关节磨损计算模型和球面坐标如图 1、2 所示。本文研究采用的人工髋关节组件包括人工股骨头、人工髋臼和用于固定髋臼的骨水泥,其中股骨头和髋臼间具有一定的间隙,各组件材料性能与几何参数分别见表 1、2^[1]。

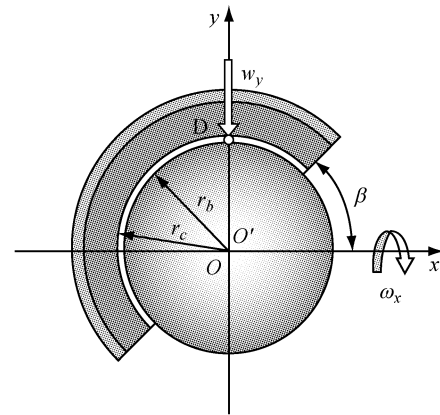


图1 倾斜状态的人工髋关节模型
 Fig.1 Model of the artificial hip joint with cup inclination

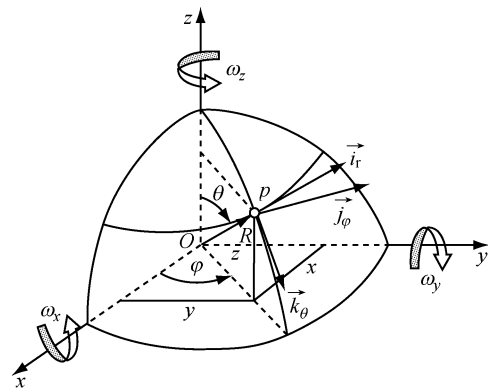


图2 人工关节的三维运动与坐标系
 Fig.2 Coordinates of the artificial hip joint with three-dimensional Euler motions

表1 金属对金属人工髋关节材料性能参数
 Tab.1 Mechanical properties of the metal-on-metal hip joint implant

材料名称	弹性模量, E/GPa	泊松比, nu
股骨头与髋臼 (CoCrMo)	210	0.30
骨水泥	2.27	0.23

表2 典型的金属对金属人工关节几何参数

Tab. 2 Geometric parameters of the metal-on-metal hip joint implant

部件名称	数值
股骨头半径, r_{f0}/mm	14.00
髋臼半径, r_{c0}/mm	14.03
髋臼厚度, d/mm	5.00
髋臼倾角, $\beta/(\circ)$	45.0

此外,人体行走过程中髋关节所承受的动态载荷如图3所示,其中一个行走周期为1.0 s,关节承受的最大载荷发生在0.6 s时刻为2.2 kN,同样人体行走一个周期过程中的三维瞬态欧拉运动如图4所示^[6,8,9]。

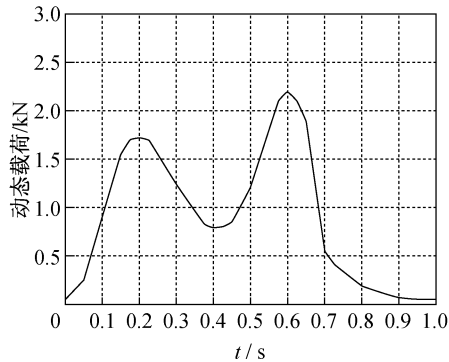


图3 人行走过程一个周期的动态载荷

Fig. 3 Dynamic loading of hip joint replacements under one walking cycle

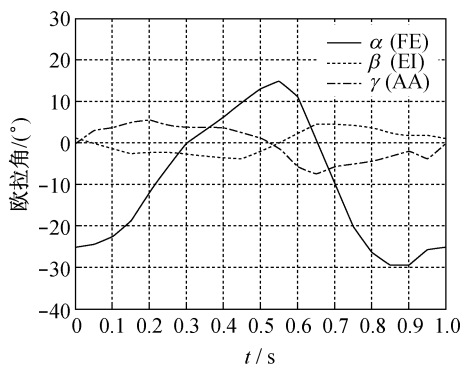


图4 人行走过程一个周期的瞬态三维欧拉运动

Fig. 4 Three-dimensional Euler Motions of hip joint replacements under one walking cycle

2.2 磨损预测模型

人工髋关节的体积磨损可以根据 Archard 磨损公式来计算^[2]:

$$V = kws \quad (1)$$

式中, V 表示体积磨损量, k 表示金属对金属人工髋

关节的体积磨损因子, w 为接触载荷, 而 s 表示两个关节界面相对运动的滑动距离。

式(1)两边同时除以面积, 可得到相应的髋关节磨损表面线性磨损深度为^[2]

$$\Delta r_i(t) = \sum_{t=1}^{n_i} k p_i s_i \quad (2)$$

式中, p_i 表示接触点的接触压力。

根据磨损量, 人工髋关节磨损预测过程的每个运动周期上每个瞬时的关节表面需要进行的几何修正为

$$r_i^k(t) = r_i^{k-1}(t) \pm \Delta r_i(t) \quad (3)$$

式中, \pm 符号表示关节轴承2个表面磨损方向不同。

在数值模拟中, 定义人工髋关节1年的循环周期为100万次^[6], 其中每步为1个循环, 周期为1 s。在实际磨损研究中, 磨损因子可以通过实验方法初步获得。对于润滑条件下金属对金属人工髋关节来说, 其磨合期内和磨合期后的磨损因子是不同的, 本文数值模拟研究所采用的磨损因子取值分别为: $5 \mu\text{m}^3/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$, $1.5 \mu\text{m}^3/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$ ^[6, 11]。用于磨损预测研究中的接触压力将通过建立有限元模型进行计算, 具体将在下文论述。

2.3 数值方法

人工髋关节动态接触与磨损预测问题是一类复杂数值模拟过程。本文采用固定-跟踪法, 同时构建 Fortran 代码来控制模拟人体行走过程各瞬时的动态接触, 有限元模型完成接触压力, 磨损预测模型完成几何修正和几何再现。为此, 首先建立人工关节接触力学模型的初始有限元代码文件, 并由相应的磨损预测模型软件控制该代码在各个瞬时的自动生成、运行及结果输入与输出。一个倾斜状态下接触表面密度为 60×60 即 3 600 网格密度的人工髋关节有限元模型如图5所示。

固定-跟踪法能解决一类球基复杂界面数值模拟中数据信息的交换问题, 其基本思想是建立两套三维几何模拟空间, 即用于数值模拟的固定空间和用于描述运动中动态几何网格信息变化的跟踪空间。本文采用固定-跟踪法完成磨损数值预测过程中的人工髋关节球面共型接触动态磨损界面的几何再现, 其数值模拟网格与跟踪网格点在两套几何空间位置可通过如下欧拉变换实现^[1-2]:

$$[r] = [A]^{-1}[r'] \quad (4)$$

式中, $[r]$ 是球基表面上某点在基准空间的坐标, 而

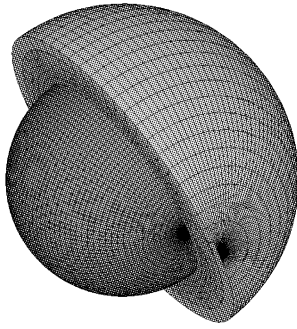


图5 人工关节有限元接触压力模型
 Fig.5 Finite element model of the contact mechanics of hip joint replacements

$[r']$ 是运动表面相应点在跟踪空间的坐标,他们在固定模拟空间的笛卡尔坐标和球面坐标分别表示为

$$[r] = \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r \sin \theta \cos \varphi \\ r \sin \theta \sin \varphi \\ r \cos \theta \end{Bmatrix} \quad (5a)$$

在动态跟踪空间笛卡尔坐标和球面坐标分别表示为

$$[r'] = \begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r' \sin \theta' \cos \varphi' \\ r' \sin \theta' \sin \varphi' \\ r' \cos \theta' \end{Bmatrix} \quad (5b)$$

式中,具有三维运动的欧拉转换矩阵可表示为

$$[A^{-1}] = \begin{Bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma \\ \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta & \sin \alpha \cos \beta \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma \end{Bmatrix} \quad (6)$$

式中, $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ 为人工髋关节三维欧拉角速度,对应的欧拉角位移为 $(\alpha, \beta, \gamma)^{[1-2]}$ 。

3 结果

上述基于所建立的人工髋关节动态接触压力有限元模型和固定-跟踪法,进行了金属对金属人工髋关节磨损数值预测。图6(a)和(b)为动态接触过程在0.6s时对应于最大载荷下人工股骨头与髋臼表面上的接触压力分布情况。图7~9分别为人工髋关节磨损周期在1、5和10年时,股骨头和髋臼磨损分布状态情况的比较。图10~12分别为人工髋关节磨损周期在1、5和10年时,股骨头和髋臼磨损深度分布状态情况的比较。图13为金属对金属人工髋关节每年的最大磨损深度。图14为金属对金属人工髋关节每年的体积磨损情况。

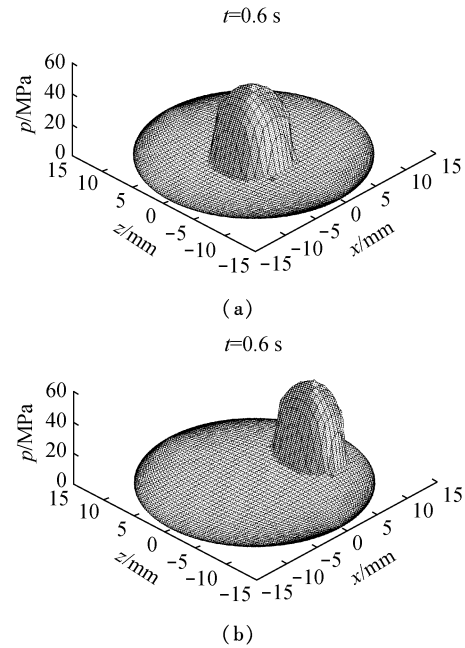


图6 人工髋关节动态过程最大载荷下接触压力 (a) 股骨头面压力分布, (b) 髋臼面压力分布

Fig.6 Contact pressure distributions of hip joint replacements with the maximum load (a) On the femur head, (b) On the acetabulum cup

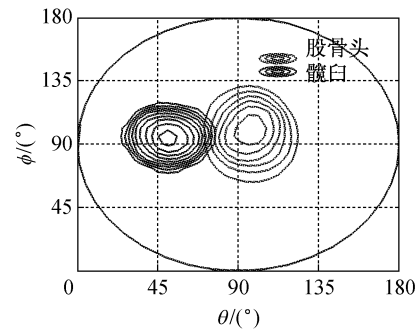


图7 人工髋关节第1年磨损分布
 Fig.7 Wear distributions of hip joint replacements at the first year

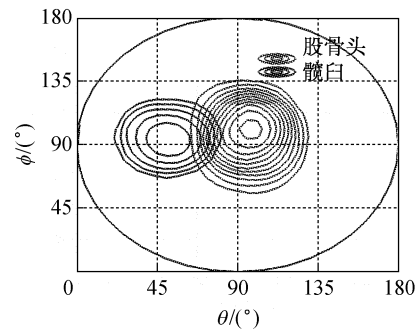


图8 人工髋关节第5年的磨损分布
 Fig.8 Wear distributions of hip joint replacements at the fifth year

4 讨论

图6给出了最大载荷发生在行走周期 $t=0.6\text{ s}$ 时刻,接触载荷 2.2 kN 时,股骨头和髌臼面上的初始磨损期对应的接触压力。可以看出,基于固定-跟踪法发展的磨损预测模型与程序能够很好地完成人工髌关节动态接触和磨损预测数值模拟工作。

图7~9给出了人工髌关节股骨头和髌臼表面在1年、5年和10年3个不同时期的磨损区域分布。可以发现,关节股骨头和髌臼的磨损区域随时间增加在不断扩大;同时期相比,股骨头面磨损区域略大于髌臼面磨损区域。通过比较3个不同时期的磨损情况,可以看出,股骨头磨损区域扩展速率均大于髌臼。进一步的分析可以从图10~12的股骨头与髌臼在3个时期磨损深度分布得知,髌臼3个时期的最大磨损深度分别为 1.8 、 2.8 和 $3.9\ \mu\text{m}$,对应的股骨头最大磨损深度分别为 1.3 、 2.2 和 $3.1\ \mu\text{m}$ 。髌臼在1~5年期间的最大磨损深度增加 $1\ \mu\text{m}$,对应股骨头最大磨损深度增加 $0.9\ \mu\text{m}$;此外,髌臼在5~10年期间的最大磨损深度增加 $1.1\ \mu\text{m}$,对应股骨头最大磨损深度增加 $0.9\ \mu\text{m}$ 。可以看出,髌臼和股骨头在初始第1年的磨损量相对较大,占整个10年周期磨损量分别为 46.15% 和 41.94% 。这说明磨合期内人工髌关节的润滑条件较差,磨合因子较大,导致初始时期磨损量偏大;一旦过了磨合期以后,关节表面最大磨损深度增加,而速率则减小。因此,提高润滑效果,降低磨损因子,将有利于减少磨损。需要指出的是,股骨头磨损区域随时间增加一直围绕中央部位扩展,而髌臼磨损区域则向髌臼边缘扩展。

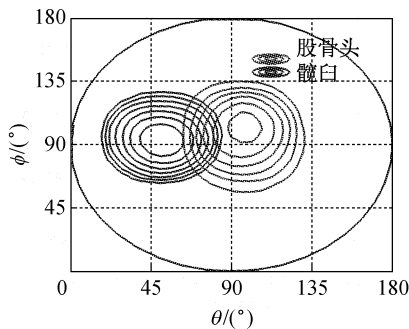


图9 人工髌关节第10年的磨损分布
Fig.9 Wear distributions of hip joint replacements at the tenth year

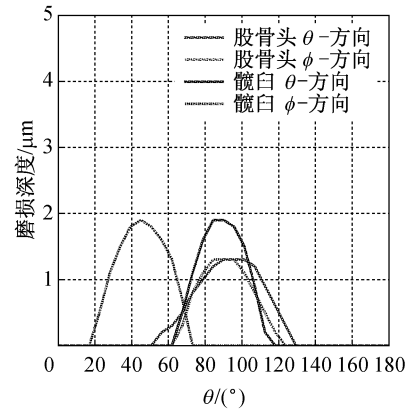


图10 人工髌关节第1年的磨损深度
Fig.10 Wear depth of hip joint replacements at the first year

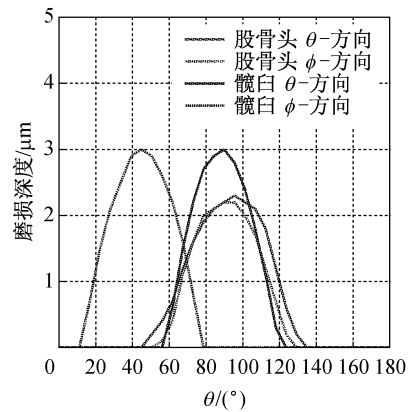


图11 人工髌关节第5年的磨损深度
Fig.11 Wear depth of hip joint replacements at the fifth year

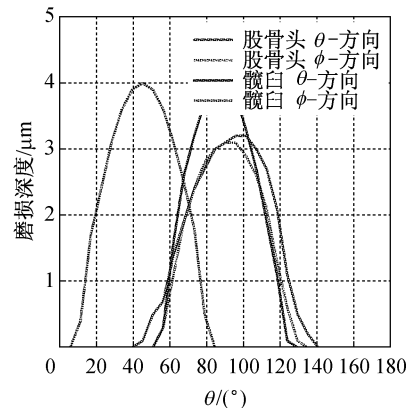


图12 人工髌关节第10年的磨损深度
Fig.12 Wear depth of hip joint replacements at the tenth year

图13给出股骨头和髌臼每年最大磨损深度及两者磨损总和。显然,髌臼每年最大磨损深度均大于股骨头,且在磨合期间的磨损速率大于磨合后期。图14为股骨头和髌臼每年体积磨损速率,与图13

给出的线性磨损相比,股骨头和髋臼每年体积磨损速率基本一致。人工髋关节体积的磨损率预测结果与文献[11]给出实验数据的趋势基本一致,这间接证实了相应的磨损深度预测的合理性。因此,不断完善磨损预测模型可以有效进行人工髋关节的磨损预测研究。此外,磨损致使人工髋关节由原始球面变为非球面,如果合理设计非球面人工髋关节,改善润滑效果,有利于降低磨损因子,进而降低磨损水平^[1-2]。有关非球面人工髋关节磨损预测问题将在后续工作展开。

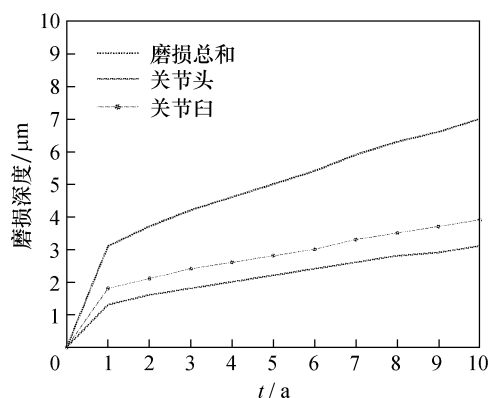


图13 人工髋关节每年最大磨损深度
 Fig.13 Maximum wear depth of hip joint replacements with years

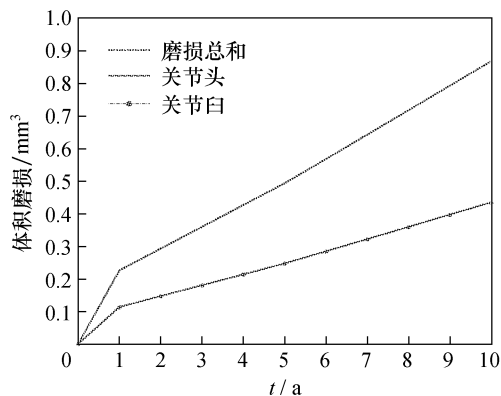


图14 人工髋关节每年体积磨损量
 Fig.14 Volumetric wear rate of hip joint replacements with years

5 结语

本文发展了具有球面双侧界面动态几何磨损变化的硬对硬人工髋关节在复杂动态载荷与瞬态运动条件下的磨损预测模型,并将其用于典型的金属对金属人工髋关节复杂三维生理运动条件下的磨损预测研究。数值预测结果表明,人工关节股骨头磨损

随时间一直在围绕中央的部位扩展,而髋臼磨损区域则向髋臼边缘扩展,初始磨合期磨损深度与体积磨损率远大于其他时期的磨损情况。此外,球面股骨头与髋臼几何随着磨损发生逐渐转变成非球面,有关非球面人工髋关节的动态接触和磨损预测问题将在未来工作中进一步开展。

参考文献:

- [1] Wang FC, Zhao SX, Félix QA, *et al.* Non-sphericity of bearing geometry and lubrication in hip joint implants [J]. *J Tribol Trans ASME*, 2009, 131(3): 031201(1-11).
- [2] Wang FC, Wang LS, Sun ML. Tribological modelling of spherical bearing with complex spherical-base geometry and motion [J]. *Trib Design, WIT Trans Eng Sci*, 2010, 66: 3-15.
- [3] 闫玉华,殷湘慧. 人工关节的研究现状和发展趋势[J]. *生物骨科材料与临床研究*, 2004, 1(4): 39-43.
- [4] Williams S, Jalali-Vahid D, Brockett C, *et al.* Effect of swing phase load on metal-on-metal hip lubrication, friction and wear [J]. *J Biomech*, 2006, 39(12): 2274-2281.
- [5] Maxian TA, Thomas TD, Pedersen DR, *et al.* A sliding-distance-coupled finite element weight polyethylene wear in total hip arthroplasty [J]. *J Biomech*, 1996, 29(5): 687-692.
- [6] Harum MN, Wang FC, Jin ZM, *et al.* Long-term contact-coupled wear prediction for metal-on-metal total hip joint replacement [J]. *Proc Inst Mech Eng, Part J: J Eng Trib*, 2009, 23(7): 993-1001.
- [7] 张玉朵. 股骨三维重建与人工髋关节生物力学研究[D]. 天津:天津大学博士学位论文,2006.
- [8] Johnston RC and Smidt GL. Measurement of hip-joint motion during walking-evaluation of an electrogoniometric method [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 69, 51(6): 1082-1094.
- [9] Paul JP. Forces transmitted by joints in the human body [J]. *Proc Inst Mech Eng*, 1966, 181(3J): 8-15.
- [10] Wang FC, Zhao SX, Xu H, *et al.* Dynamic contact mechanics and wear modelling of hip joint replacements with hard-on-hard material combination under three-dimensional Loading and transient motion [C]// *World Tribology Congress IV*. Kyoto: [s. n.], 2009.
- [11] Angadji A, Royle M, Collins SN, *et al.* Influence of cup orientation on the wear performance of metal-on-metal hip replacements [J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2009, 223(4): 449-457.