

文章编号:1004-7220(2012)01-0186-06

金属对金属髋关节动态边缘接触力学行为

程 倩¹, 王元培¹, 田 波², 刘孝光³, 王凤才^{1,2,4}

(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. 池州学院 物理与机电工程系, 池州 247000; 4. 西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049)

摘要: 目的 研究球面共型接触人工髋关节在股骨头动态位移条件下的边缘接触力学行为。方法 基于所发展的有限元球面网格数据模型, 动态模拟分析金属对金属人工髋关节在给定生理位移工况条件下的接触行为和可能诱发的边缘接触现象。结果 数值模拟表明, 随着动态位移载荷的增加, 关节接触面压力合力的垂直分力和水平分力都有上升趋势; 在边缘接触过程中压力合力的垂直分力比非边缘接触情况变化趋势要缓慢, 但相应的水平分力增大趋势更显著。此外, 边缘接触与非边缘接触对应的接触压力分布形态与接触区域也各不相同。结论 金属对金属人工关节髋臼相对股骨头过大的倾斜状态极易引起边缘接触, 动态边缘接触情况下, 将导致股骨头向髋臼内侧产生相对滑动及附加磨损的可能, 这对临床人工髋关节磨损评估与关节制造发展提供了分析依据。

关键词: 人工髋关节; 金属对金属; 边缘接触; 有限元分析; 磨损

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Dynamic edge contact behavior of metal-on-metal hip joint replacements

CHENG Qian¹, WANG Yuan-pei¹, TIAN Bo², LIU Xiao-guang³, WANG Feng-cai^{1,2,4}

(1. School of Mechanical Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;

2. National Research Centre of Bearing Technology, Wafangdian Bearing Group Corporation (ZWZ), Dalian

116300, China; 3. Department of Physical and Mechanical Engineering, Institute of Chizhou, Chizhou 247000,

China; 4. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract; Objective To investigate the edge contact behavior of conformal spherical hip joint replacements under the given dynamic contact displacement condition. **Methods** Based on the developed spherical-grid-data-model, the contact behavior and corresponding edge contact behavior of a typical metal-on-metal hip joint replacement was simulated under the increasing displacement between the acetabular cup and femoral head. **Results** It was found from the obtained results that the vertical and horizontal component of the support force due to contact pressure increased with the dynamic contact displacement increasing. The vertical component of support force for the edge contact showed a slower variation tendency than that for the non-edge contact, while the corresponding horizontal component of support force increased more significantly with the dynamic displacement. In addition, the corresponding contact pressure distributions and the contact areas of hip joint replacements for edge contact and non-edge contact were different. **Conclusions** The significant edge contact behavior of hip joint replacements with bigger cup inclination angle occurs with the increasing displacement of femoral head to the acetabular cup, which will cause the sliding between contact surfaces and additional wear since the horizontal support force increases. This provides a reference for the wear assessment and manufacturing of hip joint replacements.

Key words: Hip joint replacement; Metal-on-metal; Edge contact; Finite element analysis; Wear

收稿日期:2011-04-15; 修回日期:2011-06-16

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

髋关节是人体诸多关节中最典型的球臼关节,也是所有关节中产生病变和损伤概率较大的关节之一。人工髋关节置换,特别是全髋关节置换术,已有近百年的历史^[1-2]。恢复关节正常功能一直是人工关节置换的主要目的,然而人工关节植入人体后所产生的磨损颗粒数量及大小始终是导致生物组织反应和影响人工关节正常使用的主要问题^[3-4]。近年来,为了更好地从机理上认识人工关节设计与临床应用所遇到的接触与磨损等问题,人工关节生物力学及生物摩擦学研究得到较为广泛的关注^[5-6]。

由于人工关节置换后人体活动的生理复杂性,可能导致不同的髋关节接触力学行为^[7]。例如,人体在上楼、起立、下蹲等大幅度运动时,关节髋臼相对股骨头倾斜状态突然增大,极易引起髋关节接触应力分布集中、微分离状态或冲击状态,从而导致边缘接触发生。人工髋关节边缘接触行为较一般行走时的情况要复杂得多^[8]。边缘接触过程中的力学状态及接触行为,会进一步影响人工髋关节轴承表面相对运动与磨损;因此,研究人工髋关节边缘接触也是认识关节磨损机理问题的重要内容。运用数值模拟研究髋关节的接触行为,可弥补实验研究的不足,节省费用和时间,有利于从机理上认识人工髋关节接触与磨损问题。

本文以金属对金属人工髋关节为研究对象,采用有限元法建立人工髋关节接触力学模型,在髋臼相对股骨头倾斜状态变化和给定动态接触位移条件下,等效模拟人体复杂踩踏等生理运动导致的关节动态边缘接触行为,并与非边缘接触情况进行对比分析,为临床人工髋关节置换术提供理论参考。

1 模型及方法

1.1 关节几何及有限元模型

典型的人工髋关节由人工股骨头、髋臼、关节柄及髋臼内衬等组成,股骨头通过关节柄的带动,在髋臼窝内进行往复转动,完成关节的屈伸、内收外展以及内外旋转运动。髋臼通过骨水泥灌注固定于人体内,与水平面有一倾斜状态,该倾斜状态主要通过髋臼前倾角和外展角这两个位相参数来综合衡量^[9]。由于目前人工股骨头都设计成球形,且文中通过改变髋臼相对股骨头的倾斜状态来等效模拟髋关节在某些特殊行走姿态下的接触形态,所以髋臼的前倾

角和外展角可以综合考虑为髋臼与水平面的一个固定倾角。

本文研究的金属对金属人工髋关节球面几何结构模型如图 1 所示,股骨头直径为 28 mm,而髋臼厚度为 5 mm,两者半径间隙为 30 μm ;髋臼通过厚度为 2 mm 的骨水泥与人体紧密固定。股骨头水平放置,髋臼相对股骨头的倾斜状态是通过倾斜角度 λ 给出的。人工股骨头和髋臼材料均为钴铬钼合金 (CoCrMo),其弹性模量和泊松比分别为 210 GPa 和 0.30,具体几何与材料性能参数可参考文献[10-11]。

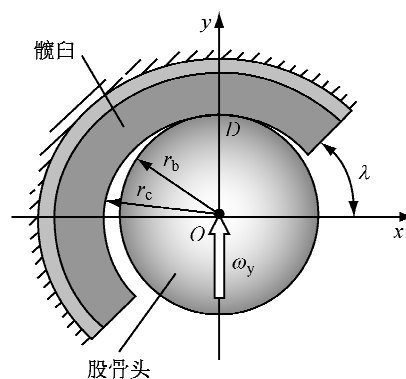


图 1 人工髋关节几何模型
 Fig. 1 Geometry of hip joint replacements

本文分别进行了 32×32 和 60×60 两种接触面网格密度的髋关节有限元数值敏感性分析,得出的数值分析结果基本一致。为下一步磨损预测模拟工作准备,故采用高密度网格 60×60 即 3 600 进行分析。其髋关节接触有限元模型如图 2 所示^[11-12]。为方便提取相应的接触压力,对髋臼和股骨头接触面网格节点进行了有序编号。同时将股骨

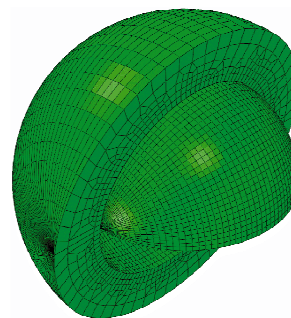


图 2 人工髋关节有限元模型
 Fig. 2 Finite element model of hip joint replacements

头表面定义为从面,髌臼接触面为主面。当髌臼相对股骨头倾斜状态确定时,对髌臼背面施加全约束,阻止髌臼的移动;而对股骨头施加垂直方向的动态位移载荷边界接触条件。当髌臼和股骨头表面相接触时,接触行为发生,产生接触效应,约束股骨头节点不能侵入髌臼面。

1.2 动态位移载荷及其算法

人体正常生理特性可描述为髌臼固定不动,而股骨头在髌臼窝内做三维旋转运动。为了便于有限元模拟分析,边缘接触可等效描述为髌臼相对股骨头较大的倾斜状态^[12]。本文以髌臼相对股骨头倾角 $\lambda = 80^\circ$ 为例,模拟分析人体在大范围运动时可能导致的边缘接触现象;并与髌臼相对倾角 $\lambda = 45^\circ$ 的非边缘接触情况进行对比分析,通过有限元法研究金属对金属人工髌关节在踩踏瞬间所表现的边缘接触力学行为。设定两接触面相接触时,对股骨头中心竖直方向施加 $0 \sim 25 \mu\text{m}$ 范围的动态位移载荷,其位移载荷随时间呈线性变化,如图3所示。

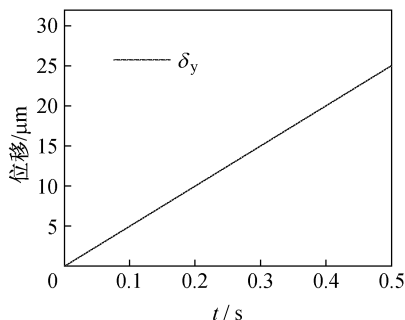


图3 股骨头动态接触位移

Fig. 3 Dynamic displacement for the femoral head

对人工髌关节施加动态位移量,其接触面压力对应的三维坐标方向的支撑分力通过式(1)~(3)计算。设定 F_x 、 F_y 、 F_z 分别为对应接触压力在 x 、 y 和 z 轴方向的分力合力,即:

$$F_x = r^2 \iint p \sin^2 \theta \cos \varphi d\theta d\varphi \quad (1)$$

$$F_y = r^2 \iint p \sin^2 \theta \sin \varphi d\theta d\varphi \quad (2)$$

$$F_z = r^2 \iint p \sin \theta \cos \theta d\theta d\varphi \quad (3)$$

式中: (φ, θ, r) 为髌关节接触面上任一点的球面坐标, p 为对应点压力值,方向为接触面上该点的法向,髌关节具体坐标系如图4所示。

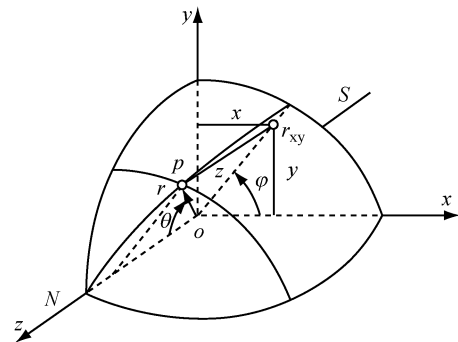


图4 人工关节对应坐标系

Fig. 4 Coordinates of hip joint replacements

2 结果

本文通过有限元法等效模拟了金属对金属人工髌关节的动态边缘接触情况,得到髌关节在动态位移条件下的接触压力大小和分布区域变化情况。由于人工关节为硬质材料,弹性模量较大,模拟过程所产生的弹性变形很小。

2.1 动态位移载荷等效分力

在人工髌关节股骨头竖直方向施加动态位移运动时,其对应的接触压力在3坐标轴方向上所形成的合力分力随位移变化情况如图5所示。由图5(a)可以看出, y 轴方向等效载荷与动态位移量呈现正比例变化趋势;当接触位移在 $0 \sim 25 \mu\text{m}$ 增加时,边缘接触对应的等效载荷为 $0 \sim 3.1 \text{ kN}$,非边缘接触状态下对应的等效载荷范围约为 $0 \sim 3.4 \text{ kN}$ 。在同等位移条件下,边缘接触情况对应的等效载荷较非边缘接触要小,其差值随动态位移量的增加呈上升趋势。

由图5(b)可以看出,人工髌关节 x 轴方向的等效分力随位移增加而不断增大;且边缘接触情况下此方向分力增加速率较快,最大位移量对应的分力达到 320 N 左右,明显高于非边缘接触状况。这是由于边缘接触髌臼倾角过大导致接触压力分布改变的结果。图5(c)所示为人工髌关节在两极方向或 z 轴方向压力合力的分力变化,在两极方向压力分布因不受倾角变化的影响,所以表现出来的分力基本为0。因此,在边缘与非边缘两种接触条件下,髌臼相对股骨头倾斜角度相差较大,关节接触压力分布不同,导致各方向分力变化不同。在动态边缘接触过程中,为达到与外载荷平衡, x 方向压力合力分力

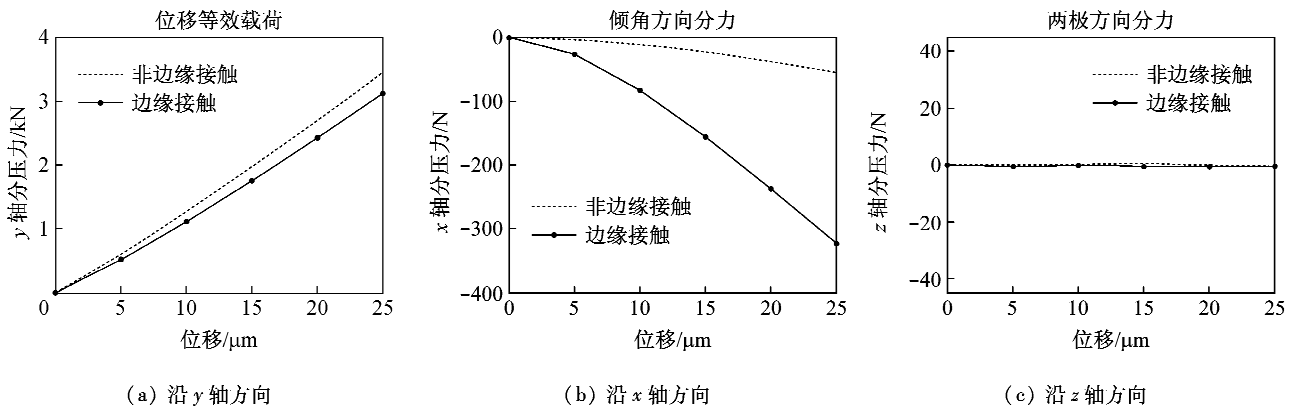


图5 接触压力合力分量
Fig.5 Support force components due to contact pressure (a) In y direction, (b) In x direction, (c) In z direction

F_x 会迫使股骨头有向髋臼内侧移动趋势而产生滑动, 有可能导致附加磨损发生。

2.2 关节面接触压力分布

为后续分析方便, 根据模拟分析结果给出了髋臼在边缘和非边缘接触状态下接触区域的分布位置及接触形态二维示意简图, 如图 6 所示。其中点 a 为初始接触点, 即预期的最大接触压力分布点; 点 b 为边缘接触状况下的实际最大接触压力点。髋关节在边缘接触时髋臼接触压力分布如图 6(a) 所示, 其有效接触区域随接触位移增加已经延伸到髋臼边缘, 接触区域无法正常向边缘外侧扩展, 最大接触压力点由初始接触点 a 转化为点 b; 非边缘接触状况下髋臼接触压力分布如图 6(b) 所示, 接触区域没有靠近髋臼边缘, 随位移载荷增加可以动态稳步扩张, 初始接触点即为最大接触压力分布点。

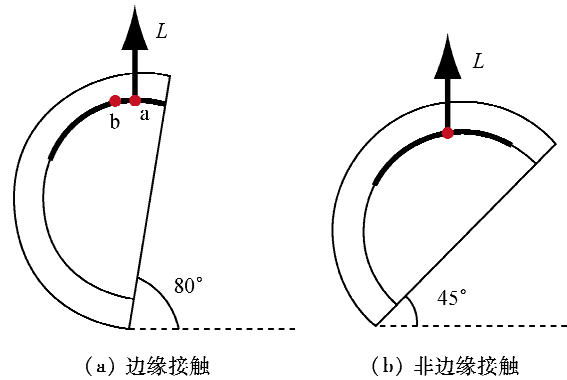


图6 接触形式与接触区域示意图
Fig.6 Schematic diagram of the contact form and contact area
(a) Edge contact, (b) Non-edge contact

髋关节股骨头面在动态位移载荷条件下的边缘与非边缘接触区域分布特征如图 7 所示。

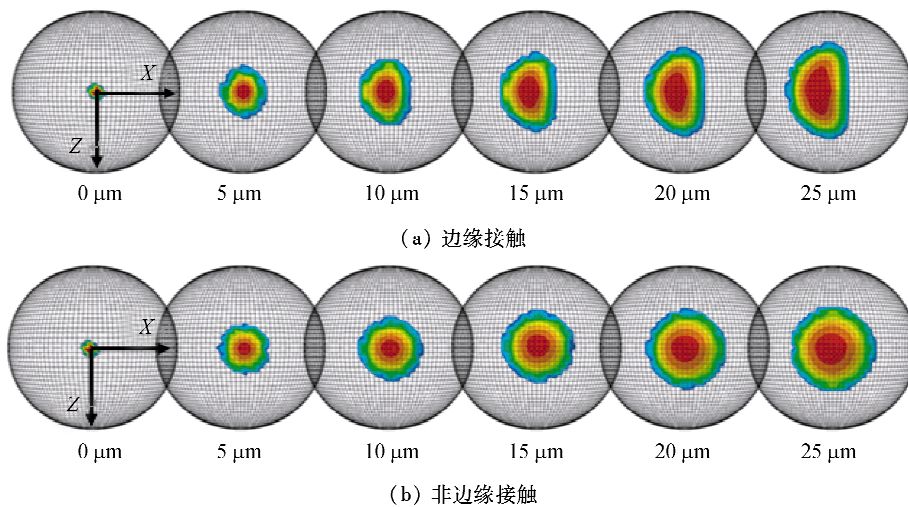


图7 股骨头接触压力分布
Fig.7 Contact pressure distributions of the femoral head (a) Edge contact, (b) Non-edge contact

由图7(a)可知,在边缘接触状况下,随着位移量不断增加,其对应的接触区域不断增大,且接触区域不规则性不断增强;位移量较大时,两极方向的接触宽度范围明显大于髌臼倾斜方向。图7(b)给出了非边缘接触条件下股骨头面的接触区域变化情况,此时接触区域有效扩张且规则对称。这表明同等接触位移条件下,边缘接触所对应的股骨头接触区域面积、接触区域分布均不同于非边缘接触,导致各方向接触压力分力变化趋势的差异。边缘接触与非边缘接触区域的磨损也会因此不同,具体相关磨损预测问题将在下一阶段工作进行。

3 讨论

关节髌臼面在最大位移条件下,接触压力三维分布状况的两个方向观测结果如图8所示。由图8(a)和(b)可以看出,在边缘接触状态下,位移量为最大值 25 μm 时,髌臼面接触压力峰值为 48.95 MPa,接触区域面积达到 96.71 mm^2 ,其对应的等效载荷约为 3.1 kN;且接触区域已经扩展到髌臼边缘,边界接触压力值远大于0。从图8(c)、(d)

可以看出,非边缘接触情况下,最大接触位移对应的等效载荷为 3.4 kN 左右,接触压力峰值为 50.30 MPa,接触面积为 98.95 mm^2 ,都略大于边缘接触相应值。边界接触压力值为 0,且接触区域在髌臼范围内正常扩张,接触压力变化较平滑。

图9为给定位移条件下髌臼面对应的 xOy 和 yOz 截面上的二维接触压力分布。由图9(a)可见,在边缘接触状况下,位移增加时,其 xOy 截面接触区域和压力值不断增大;当位移上升到一定值时,边界处的接触压力不再为 0,此时接触区域已经到达髌臼边缘,接触区域分布中心向髌臼内侧移动,最大压力点不再是理想的初始压力接触点(见图6中点a),而是重新形成最大压力分布点(见图6中点b)。图9(b)显示了 yOz 截面的接触压力呈总体对称分布,最大接触压力附近压力变化情况较平缓。且边缘接触 yOz 截面接触压力比同等位移下 xOy 截面的接触区域宽度明显增大。非边缘接触情况如图9(c)和(d)所示,在两截面上其分布区域近似,接触压力分布以几何中心轴呈对称分布。

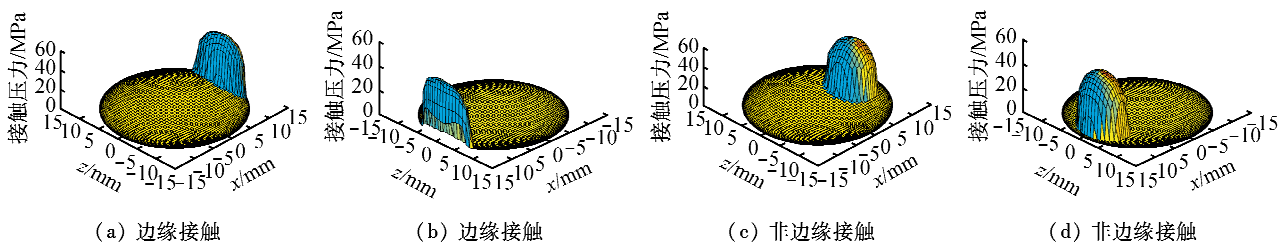


图8 髌臼面接触压力在位移峰值时的三维分布各种视角图

Fig.8 Three-dimensional contact pressure distributions under peak contact displacement for the acetabular cup (a)(b) Edge contact, (c)(d) Non-edge contact

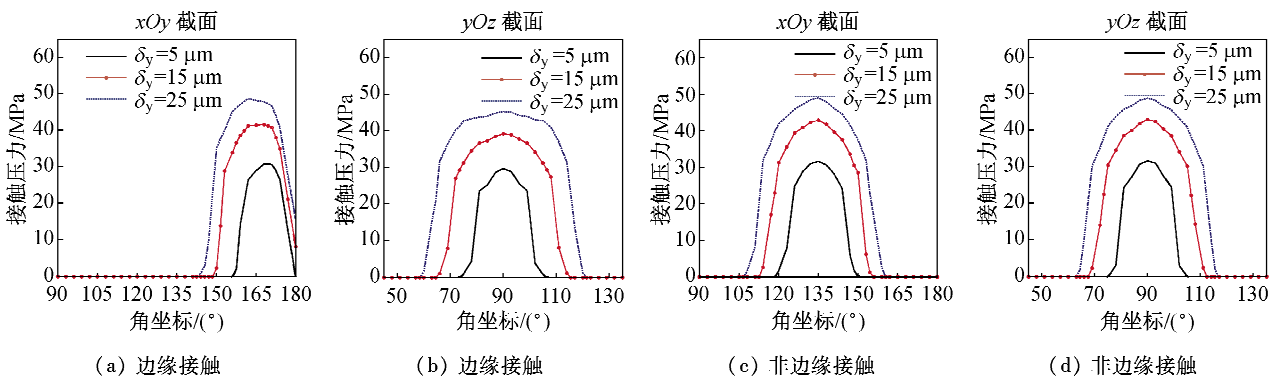


图9 截面髌臼面接触压力分布状况

Fig.9 Cross-sectional contact pressure distributions contact surface of the acetabular cup (a)(b) Edge contact, (c)(d) Non-edge contact

从图9各图的对比中可以看出,髋关节边缘接触和非边缘接触状况下关节面接触力分布不同;在边缘接触情况下,关节接触面应力分布的不规则性将直接影响人工髋关节的润滑磨损机制。

4 结论

本文建立了金属对金属人工髋关节有限元接触力学模型,通过设定髋臼相对股骨头较大倾斜状态和给定动态位移接触条件,等效分析了人体受到诸如冲击或下蹲等大幅度运动时髋关节可能产生的动态边缘接触效应。结果表明,同等接触位移条件下,与非边缘接触状况对比,边缘动态接触各向接触压力分力变化趋势存在显著差异,导致所对应的关节接触区域面积的减小、接触区域分布的不规则。髋臼相对股骨头倾角过大伴随的各向接触区域宽度范围发展的不均衡,使得最大压力分布点位置更新以及接触压力在 x 轴方向分力快速增加,将会引起股骨头向髋臼内侧相对滑动及附加磨损的可能。因此,边缘接触现象的发生可能破坏人工髋关节的正常润滑机制,使其磨损量加大;临床上可以通过提高手术技术、合理放置髋臼,而关节制造上通过优化人工髋关节设计特征等来尽量避免边缘接触现象的发生。

参考文献:

- [1] Scholes SC, Unsworth A. The tribology of metal-on-metal total hip replacements [J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2006, 220(2): 183-194.
- [2] 倪小兵. 人工髋关节设计现状与展望[J]. *生物骨科材料与临床研究*, 2004, 1(2): 55-56.
- [3] Liu H, Ellison PJ, Xu H, *et al.* Coupling of dynamics and contact mechanics of artificial hip joints in a pendulum model [J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2010, 224(8): 989-1003.
- [4] 郑明, 林凤飞, 林朝晖, 等. 不同材料假体人工全髋关节置换效果的临床观察[J]. *中国矫形外科杂志*, 2009, 17(13): 977-979.
- [5] 胡铮铭, 王元培, 田波, 等. 金属对金属人工髋关节的磨损预测[J]. *医用生物力学*, 2011, 26(5): 448-453.
Hu ZM, Wang YP, Tian B, *et al.* Wear prediction for metal-on-metal hip joint replacement [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(5): 448-453.
- [6] Learmonth ID. Biocompatibility: A biomechanical and biological concept in total hip replacement [J]. *Surgeon*, 2003, 1(1): 1-8.
- [7] Spears IR, Pfeleiderer M, Schneider E, *et al.* Interfacial conditions between a press-fit acetabular cup and bone during daily activities: Implications for achieving bone ingrowth [J]. *J Biomech*, 2000, 33(11): 1471-1477.
- [8] Kassi JP, Heller MO, Stoeckle U, *et al.* Stair climbing is more critical than walking in pre-clinical assessment of primary stability in cementless THA in vitro [J]. *J Biomech*, 2005, 38(5): 1143-1154.
- [9] 钱红波, 刘浩, 赵建宁, 等. 髋臼位相参数概念分析[J]. *医用生物力学*, 2010, 25(2): 148-151.
Qian HB, Liu H, Zhao JN, *et al.* Conception of parameters for acetabular orientation [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(2): 148-151.
- [10] Besong AA, Lee R, Farrar R, *et al.* Contact mechanics of a novel metal-on-metal total hip replacement [J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2001, 215(6): 543-548.
- [11] Wang FC, Wang LS, Sun ML. Tribological modelling of spherical bearing with complex spherical-base geometry and motion [J]. *Tribol Design, WIT Trans Eng Sci*, 2010, 66: 3-15.
- [12] 程倩, 田波, 王元培, 等. 金属对金属人工髋关节边缘接触效应[J]. *医用生物力学*, 2011, 26(6): 508-513.
Cheng Q, Tian B, Wang YP, *et al.* Effect of edge contact on metal-on-metal hip joint replacement [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(6): 508-513.