

文章编号:1004-7220(2011)06-0508-06

## 金属对金属人工髋关节边缘接触效应

程倩<sup>1</sup>, 田波<sup>2</sup>, 王元培<sup>1</sup>, 赵三星<sup>1</sup>, 陈晓明<sup>3</sup>, 王凤才<sup>1,2,4</sup>

(1. 武汉科技大学机械学院, 武汉 430081; 2. 瓦轴集团, 大连 116300;

3. 武汉理工大学生物材料中心, 武汉 430070; 4. 西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

**摘要:** **目的** 研究金属对金属人工髋关节不同行走姿态下的接触力学行为, 特别是大幅度运动可能导致的边缘接触效应。**方法** 建立球面共型接触的髋关节有限元模型, 通过改变髋臼相对股骨头的倾斜状态和对股骨头施加恒定竖直方向载荷相结合, 等效模拟分析人工髋关节不同行走姿态下的接触状态。**结果** 髋臼相对股骨头倾角在小于约 60° 范围内增加时, 其对应的最大接触压力呈下降趋势, 接触面积有所增大; 当倾角超过 80° 范围时, 关节接触区域因靠近髋臼边缘, 最大接触压力位置由初始接触点向髋臼倾斜方向移动了约 6° ~ 9° 的位置, 用以满足压力分布合力与外载荷的平衡, 接触压力和分布范围有所增加。**结论** 髋臼相对股骨头较大倾斜状态极易引起不同的边缘接触现象, 置换人体髋关节产生的边缘接触问题需要引起临床外科和关节制造上的重视。

**关键词:** 人工髋关节; 金属对金属; 边缘接触; 有限元法; 接触压力; 载荷; 生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

## Effect of edge contact on metal-on-metal hip joint replacements

CHENG Qian<sup>1</sup>, TIAN Bo<sup>2</sup>, WANG Yuan-pei<sup>1</sup>, ZHAO San-xing<sup>1</sup>, CHEN Xiao-ming<sup>3</sup>,

WANG Feng-cai<sup>1,2,4</sup> (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. Biological Materials Centre, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 4. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** **Objective** To study the contact mechanics of metal-on-metal hip joint replacements under different walking conditions, particularly for the edge contact behavior between the cup and the head of the bearing due to large range movement. **Methods** The finite element model of a typical hip joint replacement with conformal spherical bearing was established to simulate the edge contact of hip joint replacement under the given cup inclination angles and vertical loads. **Results** The maximum contact pressure decreased slightly and the contact area increased when the cup inclination angles increased within the range of 0° ~ 60°. When the cup inclination angles were more than 80°, the corresponding contact area moved to the cup edge, the maximum contact pressure and distribution range increased, but the position of the maximum contact pressure moved from the initial contact point to the new point with 6° ~ 9° in the direction of the increasing cup inclination angle to balance the corresponding contact pressure distribution and the loaded human weight. **Conclusions** Different edge contact behavior of hip joint replacements tends to occur due to the bigger cup inclination angle. Therefore, much attention should be paid to the problem of edge contact for both the clinical surgery and the manufacturing of hip joint replacements. **Key words:** Hip joint replacement; Metal-on-metal; Edge contact; Finite element method; Contact pressure; Loads; Biomechanics

收稿日期:2011-03-13; 修回日期:2011-06-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10972165), 国家重点基础研究发展计划(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。

临床医学统计表明,全球每年进行人工全髋关节置换术的人数呈不断上升趋势,且患者逐渐趋于年轻化,因此迫切需提高人工关节的使用寿命,以降低在人体中的翻修频率<sup>[1-2]</sup>。实验表明,材料为聚合物对金属的人工髋关节由于过大的磨损量会导致严重生物组织反应;而金属对金属髋关节因其低磨损率而常用于临床。然而磨损所产生的颗粒仍然是导致生物组织反应主要问题,并且极易诱发骨溶解,从而导致关节松动<sup>[1-3]</sup>。另一方面,当人体髋关节假体运动幅度过大时,可能会造成关节股骨头与髋臼边缘接触情况的发生,从而产生较高的边缘接触压力和进一步的附加磨损问题<sup>[4-5]</sup>。边缘接触可等效描述为关节髋臼相对股骨头较大的倾斜状态。尽管金属对金属材料组合的人工髋关节与其他种材料组合的对比研究不断发展,但研究金属对金属人工髋关节边缘接触行为,对于深入认识关节磨损、改善关节设计、提高关节使用寿命等仍然具有重要意义。

在全髋关节置换术中,股骨头半径、髋臼倾角以及股骨头与髋臼间的径向间隙等设计特征对关节的接触压力分布有着重要的影响<sup>[6]</sup>。关节接触面压力的分布状况决定了人工关节润滑及磨损性能。Besong 等<sup>[7]</sup>运用有限元法计算分析了金属对金属球面人工髋关节在变载荷下的接触问题。Wang 等<sup>[8]</sup>从提高润滑效果方面研究了非球面人工髋关节瞬态弹流润滑行为。近年来,也有学者在研究人工髋关节髋臼倾角变化对应的接触与磨损问题<sup>[9-10]</sup>,但都是基于髋臼植入固定倾角的。考虑不同髋臼相对股骨头倾斜状态对关节接触的影响,等效模拟人在特殊站姿下可能导致的人工关节边缘接触效应,可为临床人工髋关节植入及后续磨损预测提供理论依据。

本文以典型的金属对金属球面共型接触人工髋关节为对象,给定 3~4 倍于人体体重载荷,考虑人体不同行走姿态导致髋臼相对股骨头倾角变化,建立有限元接触力学模型对其边缘接触效应进行数值模拟分析,这有助于加深金属对金属人工髋关节边缘接触效应导致的磨损问题的认识。

## 1 模型与方法

### 1.1 人工髋关节模型

金属对金属球面共型接触人工髋关节由球形股

骨头与髋臼组成,其几何模型如图 1 所示。人工股骨头和人工髋臼材料均为钴铬钼合金 (CoCrMo)。典型的人工髋关节股骨头直径为 28 mm,与髋臼间的半径间隙为 30  $\mu\text{m}$ ,具体的人工髋关节材料性能和几何参数分别见表 1、2<sup>[1]</sup>。

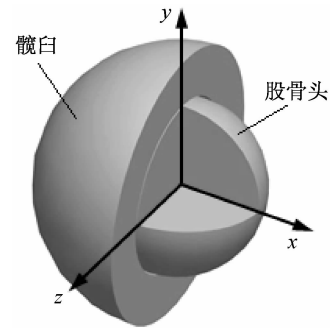


图 1 人工髋关节几何模型  
Fig. 1 Geometry of hip joint replacements

表 1 金属对金属髋关节材料性能参数

Tab.1 Mechanical properties of metal-on-metal hip joint replacements

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

表 2 人工髋关节组件几何参数

Tab.2 Geometric parameters of hip joint replacements

| 组件名称         | 数值/mm |
|--------------|-------|
| 股骨头半径, $r_b$ | 14.00 |
| 髋臼半径, $r_c$  | 14.03 |
| 髋臼厚度, $d_1$  | 5.00  |
| 骨水泥厚度, $d_2$ | 2.00  |

股骨头与股骨柄相连,股骨柄插入人体股骨髓腔内实现股骨头与股骨的连接;髋臼通过骨外科手术采用骨水泥固定在人体髋骨上,且与水平面有一固定倾角。当人工髋关节临床植入人体时,髋臼固定倾角一般控制在  $50^\circ$  以内<sup>[14]</sup>。图 2 所示为髋关节模型对应坐标系,  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴分别对应人体解剖结构位置的冠状轴、垂直轴及矢状轴,其中  $D$  点定义为股骨头与髋臼初始接触点。股骨头水平放置,髋臼与水平面倾斜角度  $\lambda$  是以坐标原点  $O$  为中心,围绕矢状轴即  $z$  轴旋转给出的。

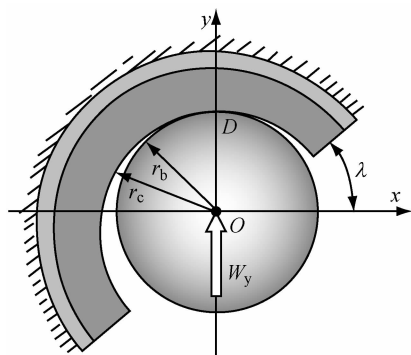


图2 髋关节载荷施加模型  
Fig.2 Loading of hip joint replacements

本文以髋臼相对倾斜角度  $\lambda$  的改变来等效模拟关节活动中髋臼相对股骨头的不同倾斜状态,其具体等效过程将在下文中展开。

人工髋关节植入人体后,髋臼固定不动,且与水平面有一固定倾角;股骨头通过股骨柄的带动,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。髋关节的实际接触方式如图3所示,股骨柄传递给股骨头力的方向决定了相应的运动趋势。在抬腿瞬间,髋臼与股骨头处于分离状态;随着股骨柄力的传动方向不同,股骨头与髋臼发生接触的区域也不同;当股骨头受力偏离髋臼对称中心线方向程度较大时,可能导致边缘接触。

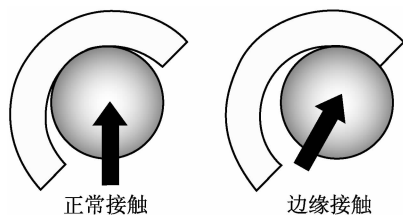


图3 髋关节实际行走状态下的接触情况  
Fig.3 Real contact situations of hip joint replacements under the walking condition

对股骨头施加恒定竖直方向载荷,以髋臼相对股骨头不同倾斜角度  $\lambda$  来等效模拟人在不同行走姿态下髋臼相对股骨头的倾斜状态,具体等效情况如图4所示。当髋臼相对倾角  $\lambda$  高于一定范围时,人工关节接触区域接近髋臼边缘,产生所谓的边缘接触效应,局部区域的润滑性能降低,使关节处于高磨损状态<sup>[9-10]</sup>。本文将考虑人工髋臼相对股骨头倾角  $\lambda$  在  $30^\circ \sim 85^\circ$  这一较大范围内的变化情况,等效

对应于某些特殊站姿及大范围运动情况等导致的股骨头与髋臼的接触行为。

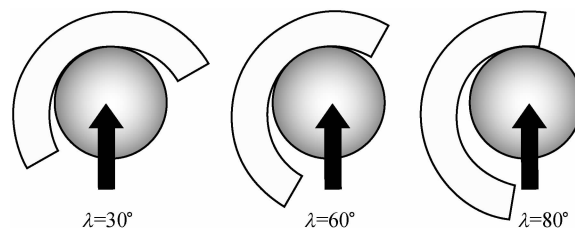


图4 不同程度的边缘接触等效模型  
Fig.4 Equivalent edge contacts of hip joint replacements

## 1.2 接触力学模型

根据人工髋关节球面共型接触特征,其界面接触问题可用式(1)球坐标下的约束条件来表示,当两接触对之间的间隙  $g(\varphi, \theta) = 0$  时,接触压力  $p(\varphi, \theta) > 0$ ,即发生接触,并在相应接触面节点上施加接触约束;当两接触对之间的间隙  $g(\varphi, \theta) > 0$  时,两者之间的接触力  $p(\varphi, \theta) = 0$ ,两接触面分离开来,同时解除相应节点上的接触约束<sup>[4]</sup>。

$$\begin{cases} g(\varphi, \theta) = 0, & (\varphi, \theta) \in \Omega_c \\ p(\varphi, \theta) > 0, & (\varphi, \theta) \in \Omega_c \\ g(\varphi, \theta) > 0, & (\varphi, \theta) \notin \Omega_c \\ p(\varphi, \theta) = 0, & (\varphi, \theta) \notin \Omega_c \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\Omega_c$  表示接触区域,  $p(\varphi, \theta)$  为接触对表面的接触压力,而接触对间的间隙  $g(\varphi, \theta)$  由两物体未变形之前的原始间隙  $g_0(\varphi, \theta)$  与接触压力所致的两接触面间的变形  $\delta(\varphi, \theta)$  共同决定,表示为

$$g(\varphi, \theta) = g_0(\varphi, \theta) + \delta(\varphi, \theta) \quad (2)$$

上述接触力学问题将通过建立人工髋关节有限元接触力学模型进行求解,有限元模型借助 HyperWorks 8.0 建立,其网格划分形式如图5、6所示。为节省模拟运算时间和为下一步边缘接触的磨损预测问题研究提供数值效率保障,在不影响分析结果的前提下,采用半球型股骨头与髋臼相对应的几何模型。同时,为便于提取相应的节点接触压力值,对股骨头和髋臼接触对表面网格节点进行有序编号,两接触对表面网格单元数对应相等。按数值模拟要求,定义髋臼接触面为主面(master surface),股骨头表面为从面(slave surface),同时从面上的节点不能侵入主面。本研究建立了  $32 \times 32$  和  $60 \times 60$  两套接

触面网格密度的髋关节有限元接触模型,其数值敏感性分析将在结果部分进行说明。

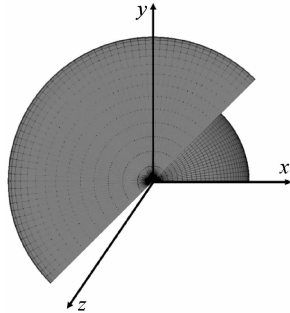


图5 髋关节有限元模型

Fig.5 Finite element model of hip joint replacements

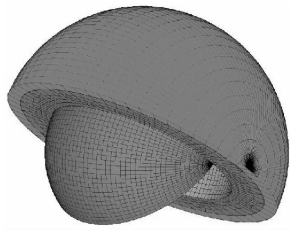


图6 髋关节球面共型接触有限元模型

Fig.6 Conformal spherical contact model

### 1.3 载荷及约束

正常步态下髋关节的接触频率和摇摆幅度因人而异,所以关节接触时所受力的冲量也不同,股骨头在踩踏瞬间所承受的载荷量明显高于人体正常体重。当髋臼与股骨头的倾斜状态确定为某一值时,对髋臼组件施加全自由度约束,以此表示髋臼与髋骨的紧密固定;同时,对人工股骨头球心施加竖直向上方向恒定载荷 2.5 kN,相当于 3~4 倍于人体平均体重,等效分析人体在踩踏瞬间的冲击力。通过改变髋臼相对股骨头倾角  $\lambda$ ,建立有限元模型进行金属对金属人工髋关节在较大活动范围内接触力学行为的数值模拟研究。通过这样的等效模拟,来研究边缘接触效应,为临床医学或关节制造提供理论依据。

接触求解是通过所发展的 Fortran 控制代码自动调用 Abaqus 6.9 有限元分析软件进行求解的。模拟过程为在法向上设置两个分析步:第 1 步定义一个小位移,用于接触对的识别;第 2 步开始对髋关节施加竖直方向载荷;然后进行有限元满足自动受力平衡的数值迭代求解。

## 2 结果

对典型的金属对金属人工髋关节模型施加竖直向上方向载荷 2.5 kN,通过改变髋臼相对股骨头倾角  $\lambda$  在  $30^\circ \sim 85^\circ$  大范围内变化等效模拟不同行走姿态下对应的髋关节接触行为。这里分别对  $32 \times 32$  和  $60 \times 60$  两种接触面网格密度的髋关节模型接触行为进行了分析。以髋臼倾角  $\lambda$  为  $45^\circ$  和  $80^\circ$  为代表,对网格形态收敛性进行评估。在  $32 \times 32$  低网格密度接触模型下,当  $\lambda$  为  $45^\circ$  时,对应接触面最大接触压力为 46.25 MPa;当  $\lambda$  为  $80^\circ$  时,相应最大接触压力为 46.09 MPa。在  $60 \times 60$  高网格密度形态下,关节在  $45^\circ$  倾斜状态对应的最大接触压力比低密度网格对应值增加了 1.32%; $80^\circ$  倾斜状态下最大接触压力比低密度网格对应接触压力增加了 0.40%。因此,两种网格密度接触模型得出的数值分析结果变化幅度很小,说明其网格划分形式数值收敛性较高。为下一步磨损预测模拟工作准备,故采用高密度网格  $60 \times 60$  即 3 600 进行接触分析。

图 7 为有限元模型数值模拟得到的髋关节接触压力分布情况。从图 7(a)可以看出,髋臼相对股骨头倾角分别为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$  时,其股骨头表面接触压力分布规则且呈对称分布;而髋臼相对倾角为  $70^\circ \sim 85^\circ$  时,接触区域存在明显的不同特征,随着倾角的增大,股骨头接触压力分布中心有向髋臼旋转方向即髋臼中心内侧方向扩展的迹象。图 7(b)显示了髋臼面接触区域随着倾角  $\lambda$  的不断增大,逐渐向边缘移动。当髋臼相对倾角高于  $70^\circ$  时,髋臼面的接触区域已经靠近髋臼边界,并无法再向边缘延伸;为了与外载荷受力平衡,压力分布有向两极方向扩展的趋势。

## 3 讨论

数值模拟的人工关节髋臼面上三维接触压力分布如图 8 所示。当髋臼相对股骨头倾角从  $30^\circ$  变化到  $60^\circ$  时,其相应的最大接触压力由 47.54 MPa 下降到 45.85 MPa,下降了约 3.55%,变化并不显著;同时,髋臼面的接触力分布区域面积则由  $77.56 \text{ mm}^2$  增大到  $84.73 \text{ mm}^2$ ,扩展了 9.24%。随着接触面积的增大,其相应的最大接触压力有所减小。如图 8(d) 所示,当相对倾角  $\lambda$  达到  $70^\circ$  时,接

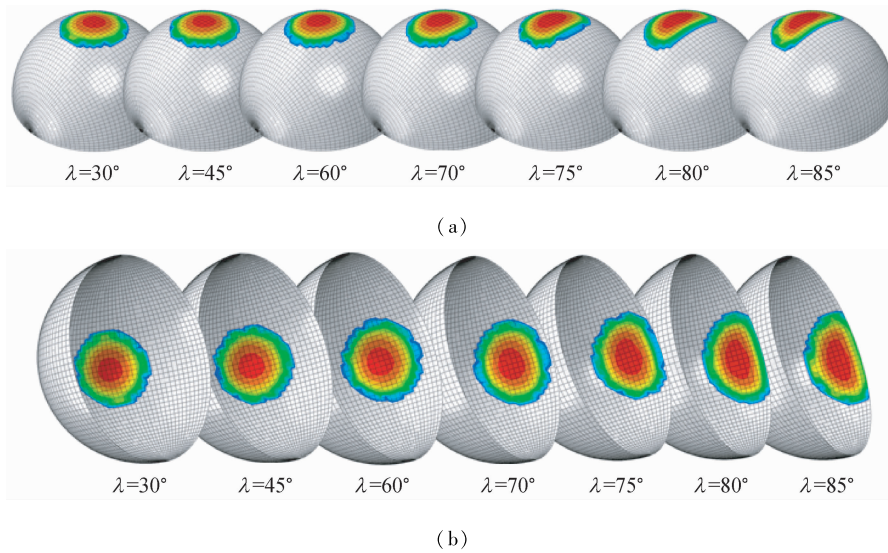


图7 不同倾角对应的股骨头(a)与髋臼(b)接触区域比较

Fig.7 Comparison of contact areas with different cup inclination angles for the femoral head (a) and the acetabular cup (b)

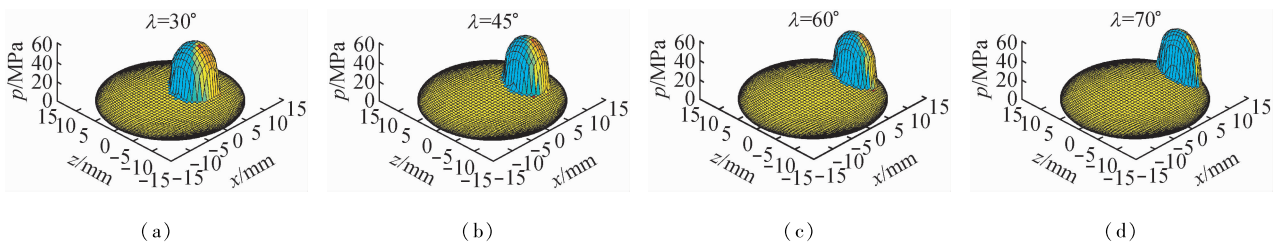


图8 髋关节髋臼面接触压力三维分布

Fig.8 Three-dimensional contact pressure distributions with different cup inclination angles

触区域已经延伸到髋臼接触面边缘,不能继续扩展而转向两极方向延伸。关于最大接触压力位置和接触情况将在下面进一步详述。这与 Angadji 等<sup>[5]</sup>用实验方法得出的结论基本一致。

对于不同人工关节髋臼相对股骨头倾斜状况,髋臼面接触压力在  $yOz$  和  $xOy$  平面上大小及分布规律比较如图9所示。当在图9(a)中相对倾角  $\lambda$  在低角度范围内变化时,即分别为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$ ,髋臼面在  $yOz$  横截面上接触压力分布变化并不显著,接触区域基本呈对称性分布;随着倾角的增大,其接触范围略有增大。同时图9(b)显示髋臼接触压力在  $xOy$  横截面上分布有向髋臼边缘移动趋势;且低角度范围内其接触压力在两方向横截面上的分布跨度范围基本一致。

如图9(c)所示,当髋臼相对股骨头倾角在  $70^\circ$  以上时, $yOz$  横截面上髋臼压力分布曲线变化比较

平缓;随着髋臼相对倾角的增大,最大接触压力变化不大,但平均压力值相对低角度接触情况有所增大。从图9(d)可以看出,在  $xOy$  横截面上,髋臼接触压力分布不再对称呈现,且接触压力峰值向髋臼内侧偏移。当髋臼在  $80^\circ$  或  $85^\circ$  高倾角时,接触压力分布区域不同于低倾角的情况,髋臼边缘存在较高接触压力幅值;髋臼面最大接触压力位置不但绕股骨头中心方向向髋臼内侧产生  $6^\circ \sim 9^\circ$  的角位移,而且幅值略有升高。当髋臼相对倾角在  $70^\circ$  以上大角度范围内变化时,其  $xOy$  截面接触域宽度明显窄于  $yOz$  截面相应宽度,从而接触区域由最初圆形逐渐向不规则的近椭圆或总体半圆形过度。因此,有限元数值模拟表明较高髋臼相对股骨头倾斜状态极易引发边缘接触,其边缘压力幅值比低髋臼角度的大许多,从而引起边缘应力集中;过大的应力集中对磨损有较大的影响,且易导致关节脱臼。

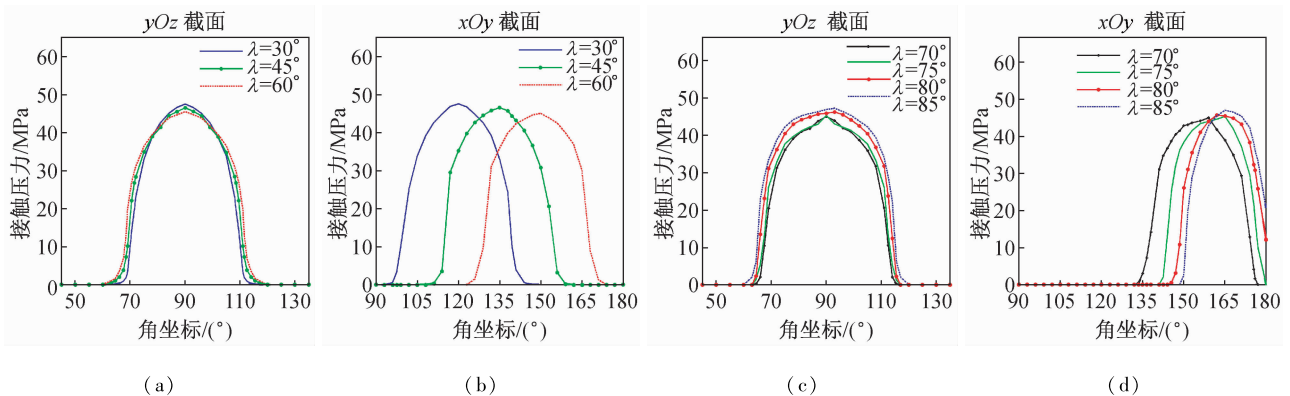


图9 不同髋臼倾角对应  $yOz$  和  $xOy$  截面接触压力分布比较 (a)、(b)  $<60^\circ$  情况, (c)、(d)  $>70^\circ$  情况

Fig.9 Cross-sectional contact pressure profiles with different cup inclination angles (a)、(b) Case for less than  $60^\circ$ , (c)、(d) Case for more than  $70^\circ$

## 4 结论

本文建立了金属对金属人工髋关节在不同髋臼相对股骨头倾斜状态下的接触力学模型,并根据此模型等效模拟分析了人在各种特殊站姿及大范围活动下髋关节边缘接触压力的分布情况。结果表明,当髋臼相对股骨头倾角在低于  $60^\circ$  范围内变化时,相应的接触压力呈对称分布,接触压力大小及接触面积变化并不显著;而当髋臼相对倾角高于  $80^\circ$  时,髋臼面上发生明显的边缘接触效应,出现髋臼边界接触压力。此外,由于接触压力合力需要与人体载荷平衡,接触区域分布向两极方向扩展;同时,最大接触压力位置由初始接触点位置向髋臼内侧偏移了约  $6^\circ \sim 9^\circ$ ,接触区域呈近似椭圆型分布。较大的髋臼相对股骨头倾角引起的边缘接触压力导致关节接触应力集中,对关节使用寿命或磨损会产生不利影响,应该引起人工髋关节临床应用和关节制造方面的重视。人工关节髋臼相对股骨头高倾斜状态变化导致的动态边缘接触效应及相应的磨损问题探讨将在下一步研究工作中进行。

## 参考文献:

[1] Wang FC, Jin ZM. Transient elastohydrodynamic lubrication of hip joint implants [J]. J Tribol-Trans ASME, 2008, 130(1): 011007(1-11).  
[2] 王成焘. 天然与人工关节中的摩擦学问题[J]. 医用生物力学, 2009, 24(5): 317-325.

Wang CT. Tribology problems in natural and artificial joint [J]. J Med Biomech, 2009, 24(5): 317-325.  
[3] WANG FC, Jin ZM. Elastohydrodynamic lubrication modeling of artificial hip joints under steady-state conditions [J]. J Tribol, 2005, 127(4): 729-739.  
[4] 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.  
[5] Angadji A, Royle M, Colling S, et al. Influence of orientation on the wear performance of metal-on-metal hip replacements [J]. Proc Inst Eng H, 2009, 223(4): 449-457.  
[6] 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.  
[7] 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.  
[8] Wang FC, Zhao SX, Félix Quiñonez A, et al. Nonsphericity of bearing geometry and lubrication in hip joint replacements [J]. J Tribol-Trans ASME, 2009, 131(3): 031201.  
[9] Amstutz HC, Campbell P, Kossovsky N, et al. Mechanism and clinical significance of wear debris-induced osteolysis [J]. Clin Orthop Related Res, 1992, 276: 7-18.  
[10] Hart AJ, Buddhev P, Winship P, et al. Cup inclination angle of greater than 50 degrees increases whole blood concentrations of cobalt and chromium ions after metal-on-metal hip resurfacing [J]. Hip Int, 2008, 18(3): 212-219.  
[11] Brodner W, Gröbl A, Jankovsky R, et al. Cup inclination and serum concentration of cobalt and chromium after metal-on-metal total hip arthroplasty [J]. J Arthroplasty, 2004, 19 (8 Suppl 3): 66-70.