

# 非球面人工髋关节接触力学

程倩<sup>1</sup>, 王慧妍<sup>2</sup>, 田波<sup>3</sup>, 赵三星<sup>1</sup>, 王凤才<sup>1,3,4</sup>

(1. 武汉科技大学机械工程学院, 武汉 430081; 2. 南京航空航天大学计算机科学与技术, 南京 210016;  
3. 瓦轴集团国家大型轴承工程技术研究中心, 大连 116300; 4. 西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

**摘要:** **目的** 由于受制造技术的局限性、可能的设计优化考虑以及临床应用的磨损等因素影响,人工髋关节轴承表面表现为非球面几何特征,可以利用有限元分析方法对非球面人工髋关节的接触力学行为进行研究。**方法** 对球面网格数据模型进行非球面重建,研究不同取向椭球面股骨头对球面髋臼几何特征的非球面金属对金属人工髋关节的接触力学表现。**结果** 非球面股骨头接触区域中心位置的平均曲率半径在一定范围内增大时,能有效降低相应关节接触面上的最大接触压力,同时接触面积有所增加;在同样载荷下,髋臼相对股骨头不同倾斜状态对非球面股骨头的接触压力峰值和面积影响较小,但压力分布有所不同。**结论** 良好地控制人工髋关节的非球面特征,有利于改善人工髋关节最大接触压力幅值大小和接触区域分布。所发展的非球面人工髋关节接触模型及数值模拟过程能够有效地运行,这为非球面关节动态接触及磨损预测问题研究提供了条件。

**关键词:** 非球面人工髋关节; 接触力学; 边缘接触; 压力分布; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

## Contact mechanics of non-spherical hip joint replacements

CHENG Qian<sup>1</sup>, WANG Hui-yan<sup>2</sup>, Tian Bo<sup>3</sup>, ZHAO San-xing<sup>1</sup>, WANG Feng-cai<sup>1,3,4</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;  
2. School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210061, China; 3. National Research Centre of Bearing Technology, Wafangdian Bearing Group Corporation (ZWZ), Dalian 116300, China; 4. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** **Objective** Due to the limitation of manufacturing techniques, possible design optimization selecting and influence of its wearing in clinical application, the bearing surface of hip joint replacements is presented as non-spherical geometry, and the finite element method can be used to study the contact mechanics behavior in such kind of non-spherical hip joint replacement. **Methods** The reconstructing of non-spherical articular surface based on spherical-grid-data model (SGDM) was developed to investigate the effect of contact mechanics of an ellipsoidal head against a spherical cup in a typical metal-on-metal hip joint replacement. **Results** The maximum contact pressure of the non-spherical bearing was decreased effectively, and meanwhile the contact area was increased when curvature radius of the ellipsoidal head around the centre of the contact zone was increased, while the effects of the cup inclination angle on the maximum contact pressure and contact area of the non-spherical bearing under the same load showed relatively small, but the contact pressure distributions were different. **Conclusions** A well-controlled non-sphericity can improve the magnitude and distribution of contact pressures on metal-on-metal hip joint replacements. In addition, the developed model and evaluation method in this paper can be used for simulation of dynamic contact and wear prediction of non-spherical hip joint replacements.

**Key words:** Non-spherical hip joint replacement; Contact mechanics; Edge contact; Pressure distribution; Finite element analysis

人工全髋关节置换术作为治疗髋关节疾病的一种主要方法,被认为是较成熟的骨科手术<sup>[1]</sup>。为了提高人工关节的使用寿命、恢复关节的正常活动,研究人员开展了大量的工作,内容涉及材料、制造、设计、运动等<sup>[2]</sup>。影响人工关节使用的一个重要因素是关节接触界面产生的磨损颗粒及其导致的生物组织反应<sup>[3-4]</sup>。接触与润滑问题的研究是认识人工髋关节磨损问题的基础。对人工髋关节股骨头与髋臼表面的几何特征与匹配状况的接触研究,有助于改进关节设计、提高人工关节使用寿命,并越来越受到人们的重视<sup>[5]</sup>。

人工髋关节置换出现以来,球面共型接触特征的人工髋关节在临床上得到广泛使用,即股骨头和髋臼表面均采用球形几何<sup>[6-7]</sup>。由于受制造技术的局限性、可能的设计优化考虑以及磨损等因素影响,人工髋关节轴承表面表现为非球面几何特征<sup>[8-10]</sup>。降低因髋关节高精度球面加工导致的生产成本,改善接触力学与润滑性能,是研究人工髋关节非球轴承表面几何特性影响的主要目的<sup>[9-11]</sup>。Wang等<sup>[10-11]</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。本文将在此基础上,以球面共型接触人工髋关节的接触模型为基础,对球面网格数据模型进行髋关节非球面网格模型的重建;并考虑髋臼相对股骨头倾角变化,研究金属对金属人工髋关节接触力学行为。

## 1 模型与方法

### 1.1 人工髋关节几何模型

典型的球面共型接触人工髋关节主要部件是股骨头和髋臼,其几何模型如图 1 所示。关节股骨头直径为 28 mm,与髋臼半径间隙为 30  $\mu\text{m}$ ;髋臼厚度为 5 mm,骨水泥厚度为 2 mm,在临床上髋臼可以通过骨水泥灌注或界面按压等技术固定在髋骨上<sup>[6,10]</sup>。金属对金属人工髋关节股骨头与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。骨水泥的弹性模量及泊松比分别为 2.27 GPa 和 0.23。

人在行走过程中,髋臼相对人体几乎是固定不动的,股骨头在髋臼窝内做三维旋转运动。由于股骨头为球形对称结构,为了分析方便,假设股骨头固定不动,以髋臼相对水平面的不同倾角  $\lambda$ ,来等效描

述相应的倾斜接触状态(见图 1)。定义  $x$  轴为髋臼倾斜方向, $y$  轴为竖直方向,而  $z$  轴为两极方向。当两关节面相接触时,点  $D$  为初始接触点。本研究以髋臼倾角  $\lambda = 45^\circ$  为代表,模拟正常小范围运动下髋臼相对股骨头倾斜状态;同时以  $\lambda = 80^\circ$  模拟髋臼相对股骨头较大倾斜状态,并通过对比分析研究髋臼两种接触倾角情况下,关节非球面特征对髋关节接触力学行为的影响。

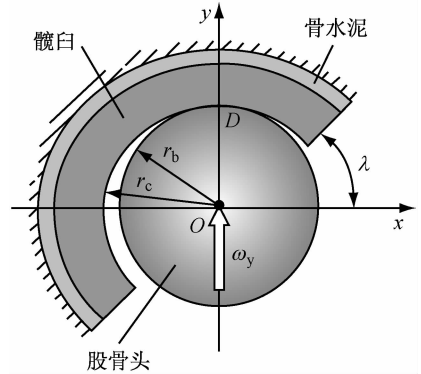


图 1 髋关节几何结构模型

Fig. 1 Geometry of the hip joint replacement

为节省模拟运算时间和为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。用有限元软件 (ABAQUS 6.9) 进行接触力学分析,设定髋臼面为主面,而股骨头面为从面。为模拟髋臼与髋骨间的紧密固定,对髋臼外表面施加全自由度约束;对股骨头球心施加竖直方向恒定载荷  $\omega_y = 2.5 \text{ kN}$ ,这相当于 3~4 倍人体平均体重<sup>[10-11]</sup>。临床上植入人体的人工髋关节中存在成分各异的润滑液,关节摩擦系数比较小,为方便研究在此假定两接触面摩擦系数均为 0<sup>[2]</sup>。

### 1.2 非球面髋关节模型

由于人工髋关节非球面几何性质包含的范围很广。有学者通过有限元模拟分析发现,椭球面髋关节所引起的接触应力相对球形要小<sup>[5]</sup>。椭球关节可以有多种分类,如球面股骨头对椭球面髋臼杯、椭球股骨头对球面髋臼、或两者皆为椭球面。本文考虑椭球股骨头对球面髋臼的非球面人工髋关节,通过控制程序对有限元球体接触模型表面网格在各个方向曲率半径进行非球量值的设定,自动产生其相应的非球面接触力学模型,模拟分析不同椭球面髋

关节的接触行为<sup>[10]</sup>。

在笛卡尔直角坐标系中,非球关节表面节点坐标方程为<sup>[10]</sup>

$$\frac{x^2}{(r_{i0} + \delta_a)^2} + \frac{y^2}{(r_{i0} + \delta_b)^2} + \frac{z^2}{(r_{i0} + \delta_c)^2} = 1 \quad (1)$$

式中: $r_{i0}$ 为球面股骨头或髋臼面节点的半径,非球变量为 $\delta_a$ 、 $\delta_b$ 、 $\delta_c$ 分别为椭球关节表面在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 半轴上的截距相对于球面关节表面半径的偏差,即 $(r_{i0} +$

$\delta_a)$ 、 $(r_{i0} + \delta_b)$ 、 $(r_{i0} + \delta_c)$ 为椭球面关节在3个半轴上的截距。这里髋臼内面对应的三维非球变量设为0,即髋臼面为理想球面。

在给定位球坐标系中,坐标 $(\varphi, \theta, r_i)$ 代表椭球关节表面任意点的球面坐标,其中半径 $r_i$ 可以由球面关节固定半径 $r_{i0}$ 和3个半轴方向上非球变量 $\delta_a$ 、 $\delta_b$ 、 $\delta_c$ 计算出<sup>[10]</sup>:

$$r_i = \left[ \frac{(r_{i0} + \delta_a)^2 (r_{i0} + \delta_b)^2 (r_{i0} + \delta_c)^2}{(r_{i0} + \delta_b)^2 (r_{i0} + \delta_c)^2 \cos^2 \varphi \sin^2 \theta + (r_{i0} + \delta_a)^2 (r_{i0} + \delta_c)^2 \sin^2 \varphi \sin^2 \theta + (r_{i0} + \delta_a)^2 (r_{i0} + \delta_b)^2 \cos^2 \theta} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

不同的非球变量取值对应不同取向的椭球关节轴承几何表面,定义 $R_m$ 为椭球股骨头面在初始接触点 $D$ 附近区域的平均曲率半径,可由如下公式计算所得<sup>[10]</sup>:

$$R_{xy} = (r_{i0} + \delta_a)^2 / (r_{i0} + \delta_b) \quad (3)$$

$$R_{yz} = (r_{i0} + \delta_c)^2 / (r_{i0} + \delta_b) \quad (4)$$

$$R_m = 2R_{xy}R_{yz} / (R_{xy} + R_{yz}) \quad (5)$$

式中: $R_{xy}$ 为椭球股骨头对应 $xOy$ 截面椭圆在初始接触点 $D$ 附近的曲率半径, $R_{yz}$ 为 $yOz$ 截面椭圆在点 $D$ 附近的曲率半径。由式(3)~(5)可知,增大 $\delta_a$ 、 $\delta_c$ 或减小 $\delta_b$ 都能使相应椭球股骨头面接触区域中心平均曲率半径增大,反之则反。

股骨头直径为28 mm的球面共型接触髋关节任一轴向上非球变量绝对值在6~9  $\mu\text{m}$ 范围内<sup>[12]</sup>。本研究将各个轴向上非球变量分别设定为 $\pm 6 \mu\text{m}$ ,表1列出了文中分析的非球变量 $\delta_a$ 、 $\delta_b$ 、 $\delta_c$ 的各种取值和对应的接触区域中心平均曲率半径变化情况。

表1 不同方向非球变量取值情况

Tab.1 Variables of non-spherical hip joint replacement in the three axial directions

坐标轴	$\delta_a / \mu\text{m}$	$\delta_b / \mu\text{m}$	$\delta_c / \mu\text{m}$	$R_m / \text{mm}$
$x$	6	-6	0	14.006 13.994
$y$	0	0	6	13.994 14.006
$z$	0	0	0	14.006 13.994

图2为股骨头在 $x$ 、 $y$ 轴方向的非球变化二维模型简图。图2(a)所示为在 $xOz$ 平面内的椭圆以 $x$

轴旋转所形成的椭球股骨头,图2(b)所示为 $xOy$ 平面内的椭圆以 $y$ 轴旋转形成的椭球股骨头。以 $z$ 轴旋转形成的非球股骨头情况与 $x$ 轴类似,这里不具体给出。

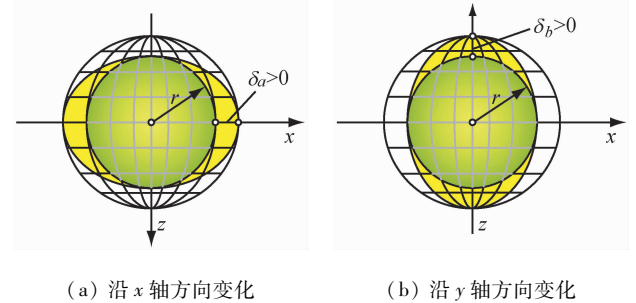


图2 髋关节股骨头非球变化简图

Fig.2 Simplified schematic of non-spherical head geometry of the hip joint replacement (a) Along x-axis; (b) Along y-axis

## 2 结果

对不同取向的椭球面股骨头和球面髋臼所构成的人工关节模型接触力学行为进行数值模拟分析,并考虑髋臼相对股骨头倾角 $\lambda$ 为 $45^\circ$ 对应的正常接触和 $\lambda$ 取 $80^\circ$ 的边缘接触两种特殊髋臼倾角状况,得出各轴向上的不同非球变量取值所对应的接触压力及接触区域分布情况。考虑股骨头非球面特征对关节接触的影响,借助球面股骨头对髋臼的接触区域情况进行对比分析。

图3~5给出了在两种髋臼倾斜状况下,股骨头面不同非球变量取值引起的接触区域变化。如图3(a)所示,在髋臼相对股骨头倾角为 $45^\circ$ 情况下,当

$\delta_a$  为 + 6  $\mu\text{m}$  时,股骨头在  $x$  轴方向的截距增大,此时其相应的接触区域由原先的球形向该轴方向拉伸成椭圆。当  $\delta_a$  取 - 6  $\mu\text{m}$  时, $x$  轴截距减小,所以其接触区域在该方向变窄。图 3(b) 所示为髋关节在边缘接触时,接触区域在  $x$  轴即髋臼倾斜方向存在不同程度的压缩,且向两极方向扩张。

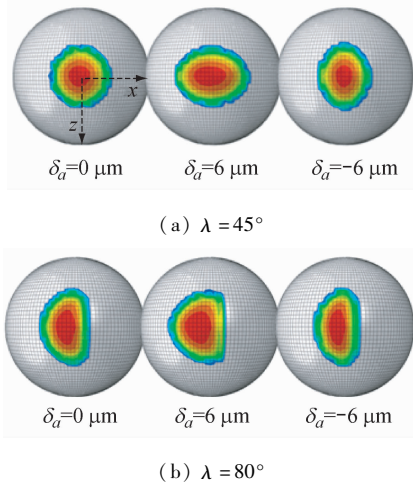


图 3 股骨头非球变量在  $x$  轴上变化的接触压力分布  
Fig. 3 Contact pressure distributions on non-spherical head surface with deviation along  $x$ -axis (a) Case for  $\lambda = 45^\circ$ , (b) Case for  $\lambda = 80^\circ$

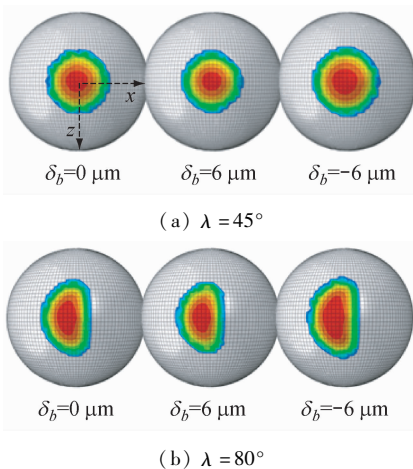


图 4 股骨头非球变量在  $y$  轴上变化的接触压力分布  
Fig. 4 Contact pressure distributions on non-spherical head surface with deviation along  $y$ -axis (a) Case for  $\lambda = 45^\circ$ , (b) Case for  $\lambda = 80^\circ$

图 4(a) 为竖直  $y$  轴方向上非球变量变化所产生的接触区域变形。此时竖直方向与图中股骨头接触面视角方向一致,可以看到无论  $\delta_b$  取何值,其接

触区域都近似圆形,但相应接触区域面积有所变化。当  $\delta_b$  取 + 6  $\mu\text{m}$  时,其接触区域变小;而  $\delta_b$  为 - 6  $\mu\text{m}$  时,接触区域相对较大。如图 4(b) 所示,边缘接触状况下  $y$  轴方向非球变量对应的接触区域形状变化也不显著,同样接触面积有一定差异。对比图 5(a) 与图 3(a) 结果,很明显看出正常接触状态下  $z$  轴方向与  $x$  轴上对应非球变量取值所导致的接触区域变化相似。

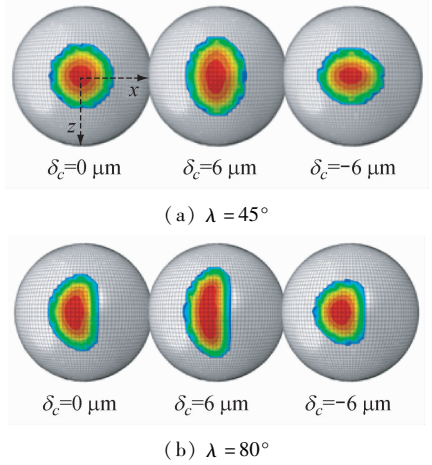


图 5 股骨头非球变量在  $z$  轴上变化的接触压力分布  
Fig. 5 Contact pressure distributions on non-spherical head surface with deviation along  $z$ -axis (a) Case for  $\lambda = 45^\circ$ , (b) Case for  $\lambda = 80^\circ$

### 3 讨论

#### 3.1 特定截面上接触压力分布

图 6 给出了髋关节正常接触状况下,股骨头不同方向非球变量变化对应的髋臼面接触压力在  $xOy$  和  $yOz$  截面上的分布情况。在髋臼倾斜方向和两极方向,其非球变量变化导致的接触压力变化规律近似;即股骨头在该方向上非球变量为 + 6  $\mu\text{m}$  时,其对应初始接触点附近平均曲率半径增大,相应截面的接触区域宽度增大,最大接触压力降低(见图 6(a)、(f));而在非球变量沿垂直方向变化时,其接触区域宽度变化较小,只是最大接触压力有所改变(见图 6(c)、(d))。基于以上讨论,可知不同方向非球变量变化可以引起接触压力分布及最大接触压力变化,合理控制关节非球面取向可以降低最大接触压力、增大接触区域、改善接触状态。

图 7 给出了在边缘接触状态下,其股骨头不同轴向上非球变量取值对应的髋臼面接触压力在  $xOy$

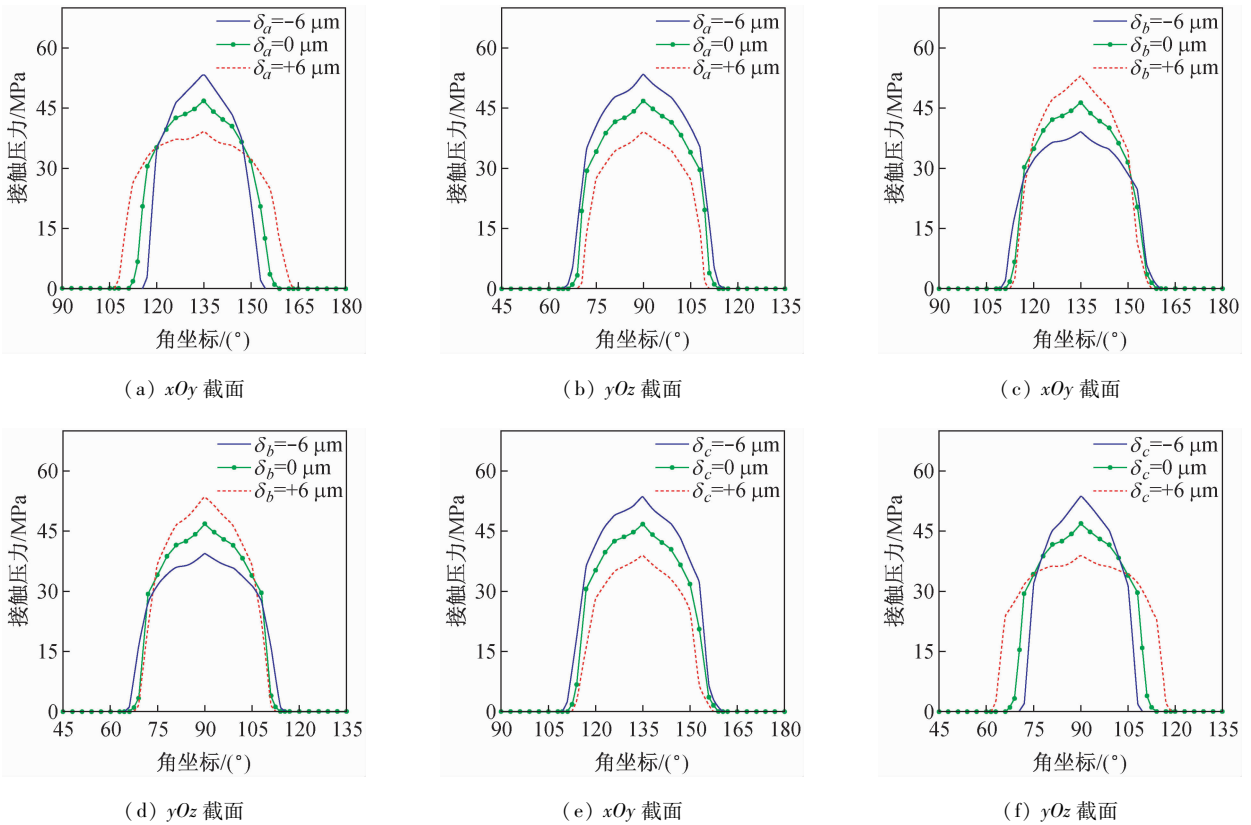


图6 正常髋臼倾角下股骨头非球变量在  $x, y$  和  $z$  方向变化对应髋臼面接触压力分布

Fig. 6 Cross-sectional contact pressure distributions on cup bearing surface under normal contact due to non-sphericity of head bearing surface along  $x$ -axis,  $y$ -axis and  $z$ -axis (a) Case for  $xOy$  plane, (b) Case for  $yOz$  plane, (c) Case for  $xOy$  plane, (d) Case for  $yOz$  plane, (e) Case for  $xOy$  plane, (f) Case for  $yOz$  plane

和  $yOz$  截面上的分布状况。边缘接触情况下,由于髋臼倾角过大,接触区域不能有效扩张,故其接触压力分布与正常接触状况下的变化规律有所不同。如图7(a)、(b)所示,在  $x$  轴方向非球变量变化相应的接触压力变化和髋臼倾角过大导致的接触压力向  $z$  轴两极方向扩张的变化趋势相抵消,使得在  $yOz$  截面其接触压力分布宽度变化不明显。在  $xOy$  横截面上,髋臼接触压力边缘值不为0,且在髋臼右侧边界处,其接触压力突然增大,这是由于过大髋臼倾斜状态产生强边缘接触所致。

对比图7(c)、(d)与图6(c)、(d)可知,髋臼倾角过大,使得接触压力在  $xOy$  横截面的分布范围变窄,而在  $yOz$  横截面上压力分布范围增大。如图7(f)所示,当  $\delta_c = +6 \mu\text{m}$  时,股骨头在初始接触点  $D$  附近的接触区域曲率半径增大,使其与髋臼侧的匹配程度更高,所以接触区域在  $z$  方向上扩张;同时倾角过大引起的接触压力分布在  $x$  轴方向不能有效扩

张,从而也转向两极方向扩张,最终导致在  $yOz$  截面接触压力分布范围明显变宽。基于以上讨论,不同方向非球变量变化同样在髋臼倾角较大时引起边缘接触压力的分布及最大接触压力的不同变化。

### 3.2 最大接触压力与接触面积

人工关节接触面良好的匹配情况,将有助于改善关节的接触力学表现,降低关节磨损。而关节接触界面的匹配程度,可以由接触面积和接触压力值来综合评定。为便于对比分析,先介绍球面共型接触髋关节对应的接触压力和面积变化情况。在髋臼相对股骨头倾角  $45^\circ$  的正常接触状况下,球面共型接触髋关节接触面最大接触压力值约为  $46.86 \text{ MPa}$ ,接触面积为  $79.28 \text{ mm}^2$ 。而髋臼倾角为  $80^\circ$  边缘接触情况时,其最大接触压力为  $46.27 \text{ MPa}$ ,对应的接触区域面积为  $82.19 \text{ mm}^2$ 。很明显,在球面股骨头和球面髋臼接触时,其最大接触压力和接触面积大小随髋臼倾角变化的结果并不显著。

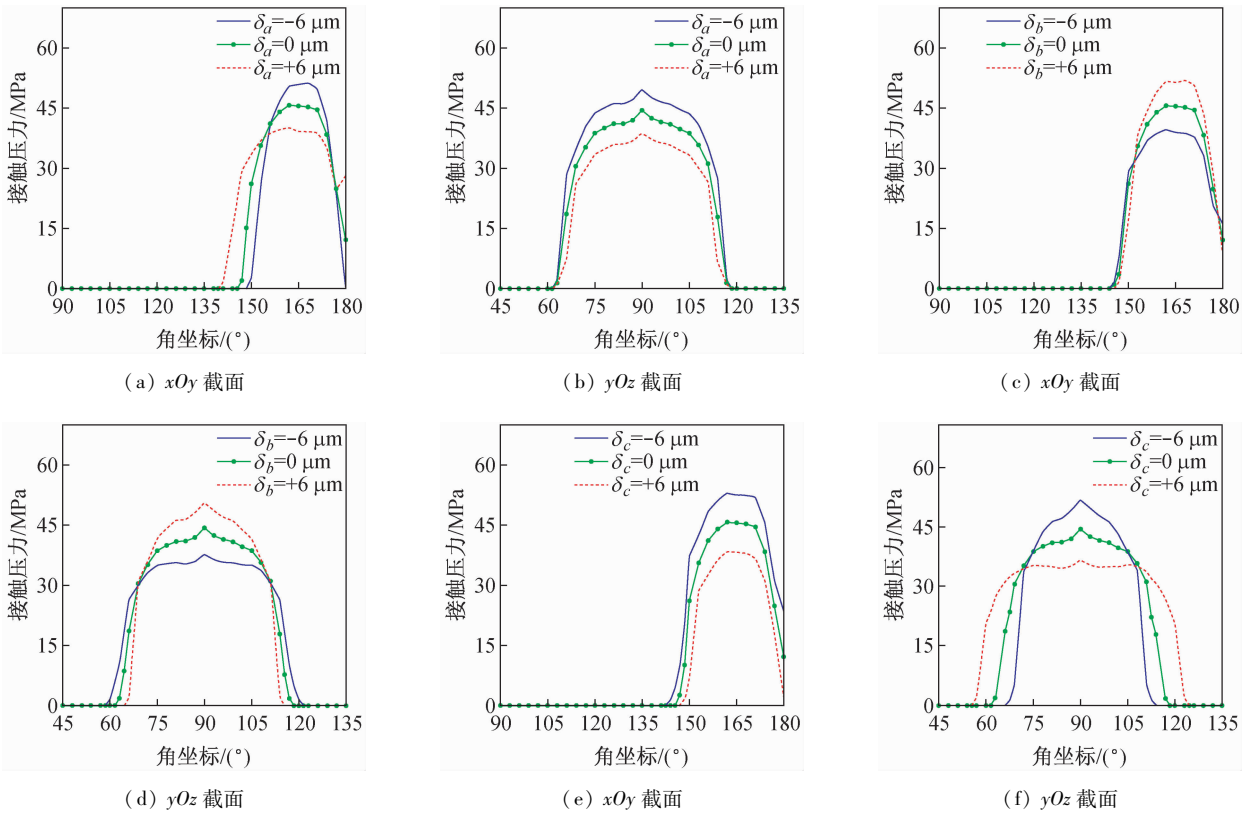


图7 股骨头非球变量  $x, y, z$  方向变化对应边缘接触压力分布  
Fig.7 Cross-sectional contact pressure distributions on cup bearing surface under edge contact due to non-sphericity of head bearing surface along  $x$ -axis,  $y$ -axis,  $z$ -axis (a) Case for  $xOy$  plane, (b) Case for  $yOz$  plane, (c) Case for  $xOy$  plane, (d) Case for  $yOz$  plane, (e) Case for  $xOy$  plane, (f) Case for  $yOz$  plane

髋臼倾角在  $45^\circ$  时,不同方向非球变量取值所引起的最大接触压力的变化如图 8(a) 所示。在股骨头  $x$  轴方向上非球变量  $\delta_a$  为  $+6 \mu\text{m}$  时,接触面对应的最大接触压力值为  $39.29 \text{ MPa}$ ,相对球面股骨头对应值  $46.86 \text{ MPa}$ ,下降了约  $16.15\%$ ;而  $\delta_a$  取  $-6 \mu\text{m}$  时,相应的最大接触压力值为  $53.57 \text{ MPa}$ ,比球面股骨头对应值增加了  $14.32\%$ 。可以看出,股骨头在  $x$  轴向上非球变量变化对应的不同平均曲率半径导致的接触压力值变化比较明显。当股骨头  $y$  轴方向上非球变量  $\delta_b$  取  $+6 \mu\text{m}$  时,其接触压力峰值为  $53.73 \text{ MPa}$ ;而  $\delta_b$  为  $-6 \mu\text{m}$  时,接触区域附近曲率半径增大,其最大接触压力下降为  $39.57 \text{ MPa}$ 。

髋臼在倾角为  $80^\circ$  时其最大接触压力变化如图 8(b) 所示。股骨头不同方向非球变量取值情况对应的最大接触压力变化和正常接触髋臼倾角为  $45^\circ$  下对应的值和变化规律基本一致。

综合两种髋臼倾斜状态下关节不同取向非球变

量对应的最大接触压力变化情况,不论改变哪个方向上股骨头的非球变量,只要在接触区域中心的平均曲率半径有所增加,都能达到降低最大接触压力的目的;且髋臼倾角变化几乎不影响非球面髋关节最大接触压力变化,仅影响接触压力区域分布。

在两种髋臼相对股骨头倾斜状态下,不同方向非球变量取值变化对人工关节接触面积的影响情况如图 9 所示。在髋臼倾角为  $45^\circ$  时,股骨头  $x$  轴方向上非球变量  $\delta_a$  取正值  $+6 \mu\text{m}$  时,其对应的接触面积为  $94.23 \text{ mm}^2$ ,比球面股骨头对应的接触面积  $79.28 \text{ mm}^2$  增加了  $18.86\%$ ;  $\delta_a$  为  $-6 \mu\text{m}$  时,关节接触面积为  $71.17 \text{ mm}^2$ ,比球面共型髋关节接触面积降低了  $10.23\%$ 。当股骨头  $y$  轴方向上非球变量  $\delta_b$  为  $+6 \mu\text{m}$  时,其接触面积为  $70.40 \text{ mm}^2$ ;而非球变量  $\delta_b$  为  $-6 \mu\text{m}$  时,其接触区域为  $92.22 \text{ mm}^2$ 。股骨头  $z$  轴方向上非球变量导致的接触面积变化趋势和  $x$  轴方向接触面积变化情况类似。对比图 9(a)、

(b)可知,关节在两种髌臼倾斜状态下其不同取向非球面股骨头对应的接触面积变化趋势基本一致。从图8、9可以发现,不同取向非球面股骨头对球面

髌臼,其最大接触压力及相应接触面积变化趋势正好相反,在最大接触压力增加时,其对应接触面积必然减小,反之则反。

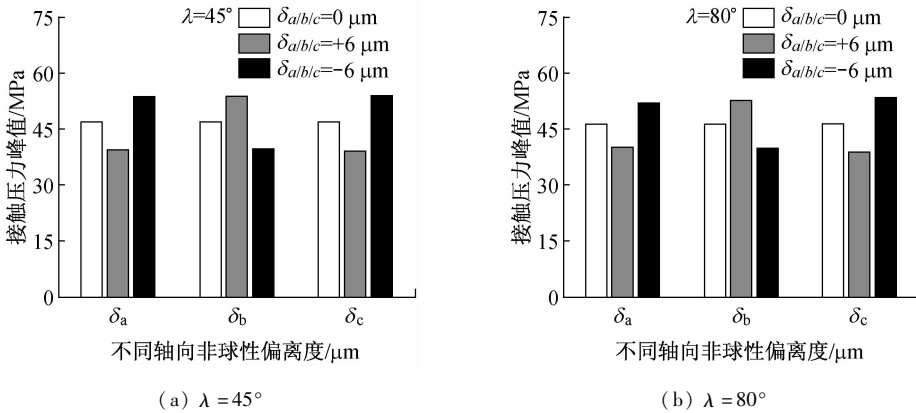


图8 不同方向非球变量对应最大接触压力

Fig. 8 The maximum contact pressure with non-spherical variables in different directions (a) Case for  $\lambda = 45^\circ$ , (b) Case for  $\lambda = 80^\circ$

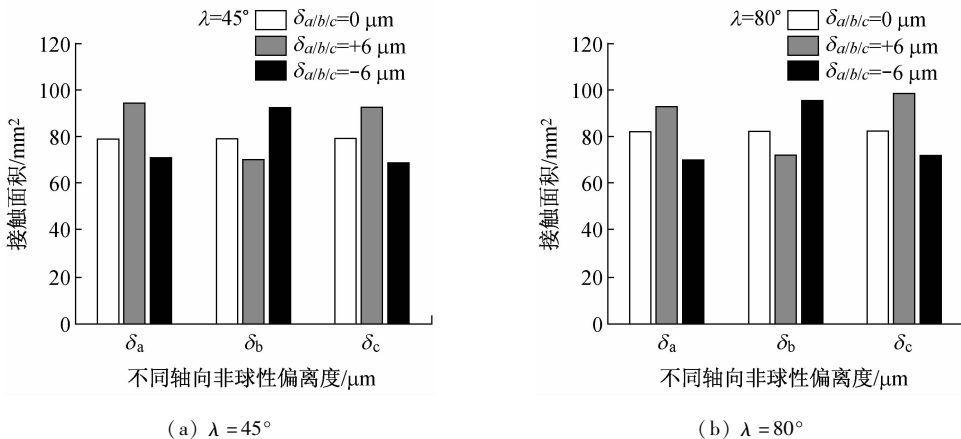


图9 不同方向上非球变量对应接触面积

Fig. 9 The contact area with non-spherical variables in different directions (a) Case for  $\lambda = 45^\circ$ , (b) Case for  $\lambda = 80^\circ$

## 4 结论

建立基于球面网格数据模型的非球面人工髌关节有限元接触力学模型和数值模拟方法,并用于研究具有椭球面股骨头对球面髌臼几何特征的非球面金属对金属人工髌关节的接触与边缘接触力学表现。结果发现,关节轴承几何的非球变量能够改变接触区域中心的平均曲率半径,当股骨头在不同轴向上非球变量变化导致在接触区域中心的平均曲率半径增大时,即通过增加相应轴承表面水平轴向截

距或减小竖直轴向截距,其作用结果使得最大接触压力降低,接触面积增大。而髌臼倾角变化对股骨头不同取向非球变量对应的接触面积和最大接触压力影响较小。如果在关节制造和设计优化上能够有效控制非球面特征,有助于降低人工髌关节最大接触压力,增大接触面积,改善接触性能。本文研究发展的非球面髌关节接触力学模型与模拟方法,将为后续非球面人工髌关节动态接触及磨损预测研究奠定基础。

## 参考文献:

- [ 1 ] Anderson AE, Ellis BJ, Maas SA, *et al.* Effects of idealized joint geometry on finite element predictions of cartilage contact stresses in the hip [ J ]. *J Biomech*, 2010, 43( 7 ): 1351-1357.
- [ 2 ] Wang FC, Brockett CL, Williams S, *et al.* Lubrication and friction prediction in metal-on-metal hip joint implants [ J ]. *Phys Med Biol*, 2008, 53( 5 ): 1277-1293.
- [ 3 ] Saikko V, Caloni O. An improved method of computing the wear factor for total hip prostheses involving the variation of relative motion and contact pressure with location on the bearing surface [ J ]. *J Biomech*, 2003, 36( 12 ): 1819-1827.
- [ 4 ] Rixath E, Wendling-Mansuy S, Flecher X, *et al.* Design parameters dependences on contact stress distribution in gait and jogging phases after total hip arthroplasty [ J ]. *J Biomech*, 2008, 41( 5 ): 1137-1142.
- [ 5 ] 韩树洋, 葛世荣. 股骨头形状对人工髋关节力学行为影响的有限元分析[ J ]. *航天医学与医学工程*, 2010, 23( 5 ): 367-370.
- [ 6 ] 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 replacements [ J ]. *J Med Biomech*, 2011, 26( 6 ): 508-513.
- [ 7 ] Leyen S, Kobel S, Weber W. Sphericity related contact mechanics in ceramic-on-ceramic hip joint replacements [ J ]. *J Biomech*, 2006, 39( Suppl 1 ): S530.
- [ 8 ] Rosenberg O, Gawlik J, Mamalis AG, *et al.* Trends and developments in the manufacturing of hip joints: Overview [ J ]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2006, 27( 5-6 ): 537-542.
- [ 9 ] Suhendra N, Stachowiak GW. Computational model of asperity contact for the prediction of UHMWPE mechanical and wear behaviour in total hip joint replacements [ J ]. *Tribol Lett*, 2006, 25( 1 ): 9-22.
- [ 10 ] Wang FC, Zhao SX, Félix Quiñonez A, *et al.* Nonsphericity of bearing geometry and lubrication in hip joint replacements [ J ]. *J Tribol*, 2009, 131( 3 ): 031201.
- [ 11 ] Wang FC, Jin ZM. Effect of non-spherical bearing geometry on transient elastohydrodynamic lubrication in metal-on-metal hip joint implants [ J ]. *Proc Inst Mech Eng J*, 2007, 221( 3 ): 379-389.
- [ 12 ] Medley JB, Krygier JJ, Bobynd JD, *et al.* Kinematics of the MATCO hip simulator and issues related to wear testing of metal-metal implants [ J ]. *Proc Inst Mech Eng H*, 1997, 211( 1 ): 89-99.