

使用大直径陶瓷头全髋关节年轻患者高交联聚乙烯的2年磨损率

孙久一¹, 符培亮² (¹解放军455医院骨科, 上海市 200052; ²上海长征医院关节外科, 上海市 200052)

文章亮点:

- 1 文章评估了大直径 BIOLOX[®] Delta 陶瓷球头应用于年轻活跃患者的有效性和安全性, 并在最短 2 年的随访中对第 3 代高交联聚乙烯的磨损率进行放射学测量。
- 2 试验结果显示, 年轻活跃患者使用 36 mm 陶瓷球头对高交联聚乙烯的全髋关节置换临床表现优异, 无假体碎裂和关节脱位。与目前的金属对第 2 代高交联聚乙烯关节相比, Roman 分析显示磨损率更低。
- 3 文章的不足包括样本量小, 随访时间较短; 用 Livermore 的方法测量聚乙烯的磨损本身有误差; 另外使用的是非骨水泥关节, 在测量过程中, 由于金属白的掩盖, 有时较难确定股骨头中心点。

关键词:

植入物; 人工假体; 高交联聚乙烯; 陶瓷球头; 全髋关节置换; 磨损分析

主题词:

关节成形术, 置换, 髋; 陶瓷制品; 聚乙烯; 脱位

摘要

背景: 假体摩擦界面是全髋关节研究的热点, 然而聚乙烯的磨损微粒可诱导炎症反应使假体周围骨溶解并导致假体松动。为了减少聚乙烯的磨损, 一方面选择陶瓷对陶瓷、陶瓷对聚乙烯的摩擦界面, 另一方面选择更强度高的高交联聚乙烯材料。在年轻活动量大的患者中, 陶瓷头的应用是一大进步。

目的: 评估大直径氧化铝基复合陶瓷(BIOLOX[®] delta)球头对第 3 代高交联聚乙烯(Trident X3, Stryker, Mahwah, NJ)全髋关节在年轻患者中的安全性, 并在最短 2 年的随访后对高交联聚乙烯的磨损率进行放射学测量。

方法: 纳入解放军 455 医院 2008 年 7 月至 2010 年 6 月收治的 30 例(32 髋)60 岁以下非骨水泥全髋关节置换患者, 采用 36 mm BIOLOX[®] delta 陶瓷球头 (CeramTec, Plochingen, Germany)对高交联聚乙烯的全髋关节, 应用 Roman 软件(Robert Jones & Agnes Hunt Orthopaedic Hospital, Oswestry, United Kingdom)进行磨损分析。患者平均年龄(56.8±6.5)岁。

结果与结论: 随访 2-3.7 年, 无关节脱位、球头碎裂或任何关节松动和骨溶解的影像学证据。平均 Harris 评分由置换前的(19.9±7.3)分(11-36 分)提高到置换后 6 个月的(35.3±5.4)分。置换磨合期后的平均磨损率为(0.022±0.11) mm/年。提示年轻患者使用大直径陶瓷球头对高交联聚乙烯全髋关节有更高的安全性, 即出现关节脱位、假体碎裂、磨损率更低。

孙久一, 符培亮. 使用大直径陶瓷头全髋关节年轻患者高交联聚乙烯的 2 年磨损率[J]. 中国组织工程研究, 2014, 18(35):5595-5599.

Large-diameter ceramic head articulation against highly cross-linked polyethylene in young patients: 2-year wear rate

Sun Jiu-yi¹, Fu Pei-liang² (¹Department of Orthopedics, 455 Hospital of Chinese PLA, Shanghai 200052, China; ²Department of Joint Surgery, Shanghai Changzheng Hospital, Shanghai 200052, China)

Abstract

BACKGROUND: Prosthesis friction interface is a hot focus in the study of total hip joint. Polyethylene wear particles induced inflammatory reaction, resulting in osteolysis surrounding the prosthesis and prosthesis loosening. To reduce polyethylene wear, ceramics-ceramics and ceramics-polyethylene friction interfaces were selected. High cross-linked polyethylene material with high intensity was selected. In young patients with large activity amount, the application of ceramic head is a great progress.

OBJECTIVE: To assess the safety of large-diameter alumina ceramic matrix composites (BIOLOX[®] delta) ball on third-generation highly cross-linked polyethylene (Trident X3, Stryker, Mahwah, NJ) total hip arthroplasty in young patients, and to perform radiological measurements of high cross-linked polyethylene wear rate in the shortest two years after follow-up.

METHODS: From July 2008 to June 2010, wear analysis of 30 cases aged less than 60 years with 32 hips with 36-mm BIOLOX[®] delta ceramic femoral heads (CeramTec, Plochingen, Germany) on highly cross-linked polyethylene was performed in the 455 Hospital of Chinese PLA using Roman software (Robert Jones & Agnes Hunt Orthopaedic Hospital, Oswestry, United Kingdom). The mean age of patients was 56.8 ± 6.5 years.

RESULTS AND CONCLUSION: Follow-up was conducted from 2 to 3.7 years old. There were no imaging evidences, such as dislocation, the ball head fracture or joint loosening or osteolysis. Mean Harris score was

孙久一, 男, 1975 年生, 辽宁省辽阳市人, 汉族, 2008 年解放军第二军医大学毕业, 硕士, 主治医师, 主要从事关节外科研究。

doi:10.3969/j.issn.2095-4344.2014.35.004
[http://www.crter.org]

中图分类号:R318
文献标识码:A
文章编号:2095-4344
(2014)35-05595-05
稿件接受: 2014-07-19

Sun Jiu-yi, Master, Attending physician, Department of Orthopedics, 455 Hospital of Chinese PLA, Shanghai 200052, China

Accepted: 2014-07-19

increased from (19.9±7.3) (11–36) before replacement to (35.3±5.4) at 6 months after replacement. The mean wear rate was (0.022±0.11) mm/year after run-in period. These data indicated that large-diameter ceramic head articulation against highly cross-linked polyethylene in young patients would have high safety for joint dislocation, prosthesis fragmentation and low wear rates.

Subject headings: arthroplasty, replacement, hip; ceramics; polyethylene; dislocations

Sun JY, Fu PL. Large-diameter ceramic head articulation against highly cross-linked polyethylene in young patients: 2-year wear rate. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2014;18(35):5595-5599.

0 引言 Introduction

人工全髋关节置换对于解决严重关节疾病患者的关节功能障碍和疼痛发挥了独特的作用, 自诞生以来临床医生和工程师不断的改进假体设计和假体材料, 以最大化人工关节的使用寿命。假体摩擦界面一直以来就是人工关节研究的热点。人工关节的无菌性松动是影响全髋关节系统长期寿命的主要原因, 各种磨损微粒诱发炎症反应, 因此, 磨损和骨溶解是影响髋关节置换后假体寿命并最终导致失败的主要因素^[1-2]。为使患者获得满意的效果, 减轻患者痛苦, 临床医生不断寻求新的材料, 力求达到完美的假体摩擦界面, 以减少聚乙烯磨损, 包括金属-金属、金属-聚乙烯、金属-陶瓷、陶瓷-聚乙烯、陶瓷-陶瓷^[3-4]。对于年轻的患者, 陶瓷-陶瓷摩擦界面一向表现出极低的磨损率, 仍然是临床医生的最佳选择^[4-7], 然而由于患者经济条件的限制, 常常选择陶瓷-聚乙烯界面的全髋关节系统。陶瓷头在临床上的使用始于20世纪70年代。最早在临床使用的陶瓷头是三氧化二铝, 体外模拟及临床研究均表明, 氧化铝对聚乙烯的磨损低于金属头, 但单纯的氧化铝材质发生股骨头破裂的概率较高。为了克服这一局限性, 1985年首次报道了氧化锆陶瓷头, 由于氧化锆的生物惰性使其具有优越的生物相容性。虽然氧化锆的优点很多, 但也有不少临床报告表明氧化锆的临床结果并不如人意, 松动的发生率较高, 主要是由于氧化锆的纯度不够所造成。目前, 大部分在临床使用的是氧化铝陶瓷头, 最近全球最大的陶瓷头生产厂家CeramTec公司已经生产出将氧化铝和氧化锆结合在一起的BIOLOX[®] delta陶瓷头, 可以有效利用氧化锆的硬度又可以有效控制氧化锆晶体结构的改变, 使其同时具有氧化铝和氧化锆的优点。迄今为止甚少有关大直径陶瓷球头BIOLOX[®] delta陶瓷(CeramTec, Plochingen, Germany)对聚乙烯全髋关节体内磨损率的研究^[3-7]。文章对30例(32髋)接受36 mm大直径BIOLOX[®] delta陶瓷头(CeramTec, Plochingen, Germany)对第3代高交联聚乙烯界面的磨损率进行放射学测量。

1 对象和方法 Subjects and methods

设计: 前瞻性病例分析。

时间及地点: 于2008年7月至2010年6月在解放军455医院完成。

对象: 2008年7月至2010年6月解放军455医院30例

(32髋)60岁以下患者接受了非骨水泥全髋关节置换, 采用了36 mm大直径陶瓷球头对高交联聚乙烯的摩擦界面, 并对其进行了前瞻性、最短2年的随访。所用假体为Accolade TMZF股骨柄、BIOLOX[®] delta球头、Trident PSL白杯, Trident X3 HCLP衬(Stryker, Mahwah, NJ)。白杯型号为54, 56, 58或62 mm, 见表1, 具有良好的生物相容性。

30例患者(32髋)中, 男19例, 女11例。术前诊断股骨头缺血性坏死12髋, 骨性关节炎7髋, 创伤性关节炎6髋, 髋关节发育不良4髋, 类风湿关节炎3髋, 均为初次手术, 接受手术时本组患者平均年龄(56.9±6.5)岁。

病例纳入标准: ①患者的平均年龄在60岁左右。②平时的活动量大, 对关节要求较高。③对治疗及试验方案知情同意, 且得到医院伦理委员会批准。

病例排除标准: 高龄老年患者, 复杂的关节疾患合并转子骨折、股骨颈骨折、先天性畸形的患者。

方法: 手术由本院2位高年资关节外科医生完成。均采用后外侧标准入路, 手术技术相同。在末次随访中, 临床评估包括UCLA评分、WOMAC指数以及Harris髋关节评分。影像学评估包括站立位双髋正位片, 采用Livermore等^[8-9]发明的同心圆技术以计算机辅助的Roman 1.70软件(Robert Jones & Agnes Hunt Orthopaedic Hospital, Oswestry, United Kingdom)对比术后6个月和术后最短2年的正位X射线片, 进行聚乙烯磨损评估。当测量包含负值时被认为是最好的情况; 将负值视作零时则为磨损的最坏情况。由2位独立观察者分析磨损数据。用EBRA软件(Einzel-Bild-Roentgen-Analysis, University of Innsbruck, Austria)测量髋臼的前倾角和外展角^[10-11]。

置换方法: 本组32髋均采用髋关节后外侧入路, 髋臼侧按外展40°–45°, 前倾15°–25°为置入标准, 股骨侧为非骨水泥假体, 股骨近端开口后, 先进行远端扩髓, 待感觉到扩髓钻与股骨皮质相接触为止, 确定远端尺寸。然后使用比根据术前X射线片模板测量的近端号码小一号的扩髓锉扩近端, 再使用最后大小的扩髓锉扩近端, 安装试模头颈复位测试松紧及双下肢等长后, 安装股骨假体, 擦净假体颈部后, 安装陶瓷头, 复位。使用高分子编织线重建短外旋肌群。术后安放自体血回输器。术后48–72 h拔出引流管。术后3 d使用助步器部分负重行走, 术后4周完全负重行走。

髋关节功能评估: 利用Harris髋关节评分对所有髋关

节进行功能评定, 包括术前及末次随访中。在末次随访中, 临床评估还包括UCLA评分和WOMAC指数。

X射线评价: 所有病例在置换后6, 12周、置换后6, 12, 24个月, 及最后一次随访时拍摄标准的双髋关节正位及患髋侧位片, 通过X射线观察记录有无假体松动、假体周围骨溶解、透亮线等情况, 同时对术后6个月和术后最短2年的双髋正位X射线片进行聚乙烯磨损评估。

非骨水泥髋臼的松动的概念为金属臼位置的变化或移动, 金属臼表面颗粒的脱落以及聚乙烯臼严重磨损造成的复发性髋关节脱位。股骨假体的松动概念为假体-骨界面透亮线形成。

骨溶解概念为假体周围出现的进行性非线性透亮区, 最宽处直径 > 2 mm。透亮线为假体周围出现的进行性线性透亮区, 直径 < 2 mm。骨溶解及骨透亮线出现的区域在髋臼根据Delee和Charnley的方法进行描述, 在股骨由Gruen描述的方法确定。术后6个月片与最后随访片比较, 若股骨矩吸收超过3 mm, 认为有临床意义。

磨损测量方法: 聚乙烯髋臼磨损根据Livermore等发明的同心圆技术^[8-9], 由计算机辅助的 Roman 1.70软件(Robert Jones & Agnes Hunt Orthopaedic Hospital, Oswestry, United Kingdom)进行测量。根据模板确定股骨头中心及X射线片的放大率。测量从股骨头中心至金属臼的肩部之间的距离, 比较术后6个月和最后一次随访时测量的距离, 根据随访时间计算髋臼的磨损率。

主要观察指标: Harris髋关节评分系统依据疼痛程度, 生活能力, 行走能力等项目的得分进行评估。

UCLA评分系统依据疼痛, 功能和患者满意度等项目得分进行评估。

WOMAC评分量表从疼痛、僵硬和关节功能三大方面来评估髋关节的结构和功能, 总共有24个项目, 包含了整个骨关节炎的基本症状和体征。其中疼痛的部分有5个项目、僵硬的部分有2个项目、关节功能的部分有17个项目。

统计学分析: 用单向组间相关系数比较两位观察者间的可信度, 使用SPSS 16.0软件(SPSS, Inc, Chicago, IL)完成统计描述和计算。双侧 $P < 0.05$ 为差异有显著性意义。

2 结果 Results

2.1 参与者数量分析 按意向性分析, 纳入30例全髋关节置换患者, 全部进入结果分析, 无脱落。

2.2 随访结果 本组患者平均年龄(56.9 ± 6.5)岁, 随访2-3.7年。平均 Harris评分由术前的(19.9 ± 7.3)分(11-36分)提高到术后6个月的(35.3 ± 5.4)分(21-40分)。末次随访时UCLA评分和WOMUA指数分别为 5.5 ± 1.2 (4-8)和 32.4 ± 10.7 (24-59)。聚乙烯最薄厚度为7.9 mm, 40%的测量值为负数。最佳情况下的平均磨损率为(0.022 ± 0.110) mm/年, 最差情况下的平均磨损率为(0.052 ± 0.080)mm/年, 差异

无显著性意义($P=0.82$, 图1, 2)。平均前倾角 20.3° (女性较男性稍大)、外展角为 42.6° (表2)。本文的2名作者测量这两个角度的组间相似系数分别为0.96和0.97。

本文在年轻活跃患者使用36 mm陶瓷球头对高交联聚乙烯的全髋关节置换临床表现优异, 无假体碎裂和关节脱位。与目前的金属对第3代高交联聚乙烯关节相比, Roman分析显示磨损率更低, 与文献报道的金属和陶瓷的磨损率相似。而有文献报道用边缘检测法和立体摄影测量分析所得的金属对高交联聚乙烯术后2-6年的磨损小于0.12 mm/年, 这比金属对常规聚乙烯界面的磨损率明显为低。使用Roman软件分析磨损率。测量精确、简单易用, 比其他计算机辅助的磨损测量更加便宜。本文中40%的测量值为负数, 磨损值为负数可能因磨损过小(< 1 mm)、摄片质量参差不齐或人为误差所致。本文报道的磨损率与其他研究相似, 即同时包含了最好情况和最差情况下的的磨损率。

2.3 不良事件 无关节脱位、球头碎裂或任何关节松动和骨溶解的影像学证据。

3 讨论 Discussion

聚乙烯磨损颗粒引起关节周围骨溶解与假体无菌性松动密切相关。减少聚乙烯磨损对提高假体的长期在位率有重要的意义, 其中一个重要影响因素就是股骨头假体材料, 降低股骨头假体表面的粗糙度可减低聚乙烯的磨损。陶瓷头硬度比金属强很多, 可以制造出比金属更光滑的表面, 同时无论氧化锆还是氧化铝陶瓷, 其强度及硬度均非常大, 表面很难划伤, 这也可以减少聚乙烯的研磨磨损。因此, 从20世纪70年代开始, 陶瓷及因其惰性、低摩擦性、高浸润力以及高强度在全髋关节置换术中得到了应用, 以期减少聚乙烯的磨损率和假体松动的发生率。

陶瓷人工股骨头假体具有低磨损率和产生较少磨损颗粒的特点, 因此可以通过减少假体周围骨溶解提高假体在位率, 这对活动需求较高的年轻患者, 测量聚乙烯的磨损预测髋关节假体的寿命非常重要。陶瓷头在临床上的使用始于20世纪70年代, 大量的理论研究证明, 全髋关节中由于关节磨损产生的各种磨损微粒, 尤其是聚乙烯颗粒, 诱发性反应, 最终导致人工关节的松动, 直接影响人工关节的使用寿命。BIOLOX[®] delta是以氧化铝为基质、含有氧化锆和其他纳米颗粒的陶瓷。在保留纯氧化铝陶瓷硬度的同时具提高了抗碎裂能力^[12]。第2代高交联聚乙烯采用顺序低剂量伽马射线和进行退火, 已显示出与第1代高交联聚乙烯相比, 在保持机械强度(减少疲劳性碎裂的风险)的同时增强了抗氧化能力^[13-16], 虽然第1代经过退火处理的高交联聚乙烯与常规超高分子量聚乙烯相比磨损已有降低^[17-21]。当氧化铝基质陶瓷与高交联聚乙烯构成全髋关节的摩擦界面时, 与其他界面相比有坚硬、抗刮擦、减小了摩擦系数等优势, 同时增加了浸润性, 提高了关节面的润滑并进一步减少磨损^[22-23]。

表1 研究对象所使用的髋臼型号和聚乙烯厚度

Table 1 Acetabular model and polyethylene thickness in subjects

髋臼型号	聚乙烯厚度
54 mm(15 髋)	7.9 mm
56 mm(8 髋)	7.9 mm
58 mm(8 髋)	9.4 mm
62 mm(1 髋)	11.2 mm

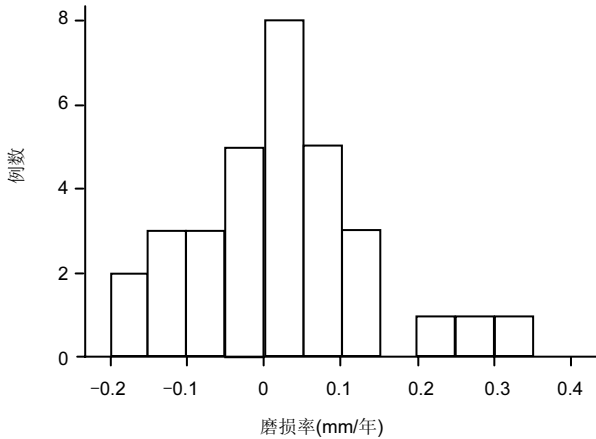


图1 最佳情况下陶瓷球头对高交联聚乙烯的磨损率

Figure 1 Wear rate of ceramic head articulation against highly cross-linked polyethylene under the optimal conditions

图注: 横坐标正数表示磨损率正值, 负数表示磨损率负值。最佳情况下的平均磨损率为(0.022±0.110) mm/年。

陶瓷-聚乙烯界面的人工髋关节具有耐磨性好、亲水性好和生物反应性低等特点, 导致磨损率低, 假体周围骨溶解少, 适合用于年轻富于运动的关节置换患者, 在金属对金属界面的假体受到广泛质疑后, 临床上对陶瓷-聚乙烯界面的疗效分析备受关注。在年轻患者的全髋关节置换中, 临床医生喜欢使用大直径陶瓷球头以减少关节脱位的发生率, 但目前尚无体内研究证实其安全性和有效性。本文评估了大直径BIOLOX[®] Delta陶瓷球头应用于年轻活跃患者的有效性和安全性, 并在最短2年的随访中对第3代高交联聚乙烯的磨损率进行放射学测量。

本文结果显示, 年轻活跃患者使用36 mm陶瓷球头对高交联聚乙烯的全髋关节置换临床表现优异, 无假体碎裂和关节脱位, 与目前的金属对第2代高交联聚乙烯关节相比, Roman分析显示磨损率更低^[13-15, 24], 与文献报道的金属和陶瓷的磨损率相似^[25-26]。而文献报告的用边缘检测法和立体摄影测量分析所得的金属对高交联聚乙烯术后2-6年的磨损小于0.12 mm/年^[20-21, 24], 这比金属对常规聚乙烯界面的磨损率明显为低^[22, 26]。

本文使用Roman软件分析磨损率。该方法从标定的多点以最适算法确定圆周^[8], 测量精确、简单易用, 比其他计算机辅助的磨损测量更加便宜^[26-28]。本文中40%的测量值为负数, 与Martell等^[26]的方法相似, 磨损值为负数可能

表2 应用 EBRA 软件测量的全髋关节置换后髋臼前倾角和外展角
Table 2 Acetabular anteversion and abduction angle after total hip arthroplasty measured using EBRA software (°)

性别	前倾角		外展角	
	$\bar{x} \pm s$	范围	$\bar{x} \pm s$	范围
男性	19.2±6.5	14-30	42.4±4.2	33-48
女性	21.1±5.2	14-30	43.1±4.0	37-49
平均	20.3±5.9	10-34	42.6±4.1	33-49

表注: 全髋关节置换后髋臼前倾角为(20.3±5.9)°, 女性较男性稍大; 外展角为(42.6±4.1)°。

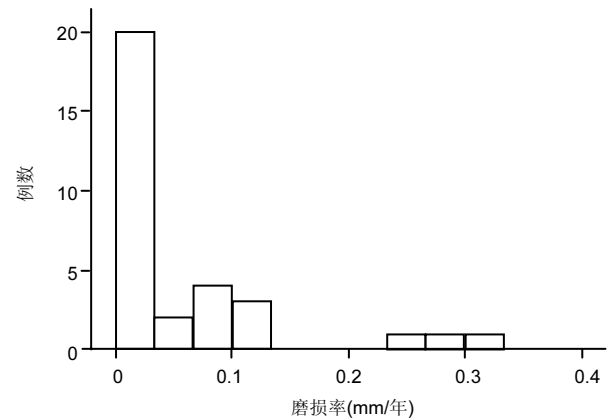


图2 将负值转换成零时最差情况下陶瓷球头对高交联聚乙烯的磨损率

Figure 2 Wear rate of ceramic head articulation against highly cross-linked polyethylene under the worst situation during the negative conversion into zero

图注: 最差情况下的平均磨损率为(0.052±0.080) mm/年。

因磨损过小(< 1 mm)、摄片质量参差不齐或人为误差所致。本文报道的磨损率与其他研究相似, 即同时包含了最好情况和最差情况下的的磨损率。

虽然第3代陶瓷界面的线性磨损表现优于陶瓷-聚乙烯界面, 然而对于年轻富于运动的患者, 陶瓷假体的破碎是严重的并发症, 原因包括设计因素、外力创伤、撞击症、高强度载荷运动等。陶瓷界面还有特有的并发症就是关节异响, 虽然异响可以不伴有疼痛和功能障碍, 但是对患者心理影响非常大。因此, 作者认为对于年轻富于运动的全髋关节置换患者, 使用大直径陶瓷球头对聚乙烯摩擦界面不失为一个最佳的选择。

本文的不足包括样本量小, 随访时间较短。用Livermore的方法测量聚乙烯的磨损本身有误差。另外使用的是非骨水泥关节, 在测量过程中, 由于金属臼的掩盖, 有时较难确定股骨头中心点。金属臼的外表面并不是半球形, 在测量从股骨头的中心至髋臼表面的距离时, 作者选择金属臼的肩部为测量点。为减少误差, 作者对每例髋关节均测量3次, 对3次测量结果进行平均。总之, 本文通过随访, 客观的分析了陶瓷头的临床结果, 为临床陶瓷头的使用提供了参考。年轻患者使用大直径陶瓷球头是本文的优势和亮点。此外, 本文还为未来进行该摩擦界面的长期磨损率研究提供了基准。

致谢: 感谢解放军第二军医大学第二附属医院骨科医院吴海山教授及李晓华教授为课题提供了详实的病例资料, 成为课题研究的基础; 感谢长征医院骨科关节外科中心的研究生为课题收集的大量数据。

作者贡献: 两位作者分别独立的对数据进行采集, 避免了文章的偏倚。

利益冲突: 文章及内容不涉及相关利益冲突。

伦理要求:

知情同意: 参与试验的患者自愿参加, 对试验过程完全知情同意, 在充分了解治疗方案的前提下签署“知情同意书”; 干预及治疗方案获医院伦理委员会批准。

医生资质: 手术的临床实施均由解放军第二军医大学第二附属医院吴海山教授及李晓华教授完成。

学术术语: 全髋关节置换摩擦界面-是关节外科医生所需要面对的最常见的选择。摩擦界面的选择是影响患者术后关节功能的重要因素之一, 其直接影响人工关节的使用寿命。

作者声明: 文章为原创作品, 无抄袭剽窃, 无泄密及署名和专利争议, 内容及数据真实, 文责自负。

4 参考文献 References

- [1] Australian Orthopaedic Association National Joint Replacement Registry. Annual Report. Adelaide, Australia, AOA, 2009.
- [2] Havelin LI, Engesaeter LB, Espehaug B, et al. The Norwegian arthroplasty register: 11 years and 73,000 arthroplasties. *Acta Orthop Scand.* 2000; 71:337-353.
- [3] Jazrawi LM, Kummer FJ, DiCesare PE. Alternative bearing surfaces for total joint arthroplasty. *J Am Acad Orthop Surg.* 1998; 6:198-203.
- [4] Ohashi T, Inoue S, Kajikawa K. The clinical wear rate of acetabular component accompanied with alumina ceramic head, in Oonishi H, Aoli H, Sawai K (eds): *Bioceramics*. St. Louis, MO, Ishiyaku EuroAmerica, 1989: 278.
- [5] Saito M, Saito S, Ohzono K, et al. Efficacy of alumina ceramic heads cemented total hip arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res.* 1992; 283:171-177.
- [6] Schüller HM, Marti RK. Ten-year socket wear in 66 hip arthroplasties. Ceramic versus metal heads. *Acta Orthop Scand.* 1990; 61:240-243.
- [7] Sugano N, Nishii T, Nakata K, et al. Polyethylene sockets and alumina ceramic heads in cemented total hip arthroplasty: A ten-year study. *J Bone Joint Surg Br.* 1995; 77:548-556.
- [8] Roman Free to Share Software Version V1.70. Available at: <http://www.keele.ac.uk/depts/rjah/>. Accessed March 20, 2008.
- [9] Livermore J, Ilstrup D, Morrey B. Effect of femoral head size on wear of the polyethylene acetabular component. *J Bone Joint Surg Am.* 1990; 72:518-528.
- [10] Fottner A, Steinbrück A, Sadoghi P, et al. Digital comparison of planned and implanted stem position in total hip replacement using a program for migration analysis. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2011; 131:1013-1019.
- [11] Manning DW, Chiang PP, Martell JM, et al. In vivo comparative wear study of traditional and highly cross-linked polyethylene in total hip arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2005; 20:880-886.
- [12] BIOLOX delta-Nanocomposite for Arthroplasty, Scientific Information and Performance Data, MT080011. Available at: <http://www.ceramtec.com>.
- [13] Dorr LD, Wan Z, Sharrard C, et al. Clinical performance of a durasul highly cross-linked polyethylene acetabular liner for total hip arthroplasty at five years. *J Bone Joint Surg Am.* 2005; 87:1816-1821.
- [14] Engh CA Jr, Stepniewski AS, Ginn SD, et al. A randomized prospective evaluation of outcomes after total hip arthroplasty using cross-linked marathons and non-cross-linked Enduron polyethylene liners. *J Arthroplasty.* 2006; 21(suppl 2):17-25.
- [15] Whittaker JP, Charron KD, McCalden RW, et al. Comparison of steady 257 state femoral head penetration rates between 2 highly cross-linked polyethylenes in total hip arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2010; 25:680-686.
- [16] Gordon AC, D'Lima DD, Colwell CW Jr. Highly cross-linked polyethylene in total hip arthroplasty. *J Am Acad Orthop Surg.* 2006; 14:511-523.
- [17] Dumbleton JH, D'Antonio JA, Manley MT, et al. The basis for a second generation highly cross-linked UHMWPE. *Clin Orthop Relat Res.* 2006; 453:265-271.
- [18] Wroblewski BM, Siney PD, Dowson D, et al. Prospective clinical and joint simulator studies of a new total hip arthroplasty using alumina ceramic heads and cross-linked polyethylene cups. *J Bone Joint Surg Br.* 1996; 78:280-285.
- [19] McCalden RW, MacDonald SJ, Rorabeck CH, et al. Wear rate of highly cross-linked polyethylene in total hip arthroplasty: A randomized controlled trial. *J Bone Joint Surg Am.* 2009; 91:773-782.
- [20] Rajadhyaksha AD, Brotea C, Cheung Y, et al. Five-year comparative study of highly cross-linked (crossfire) and traditional polyethylene. *J Arthroplasty.* 2009; 24:161-167.
- [21] Kurtz SM, Austin MS, Azzam K, et al. Mechanical properties, oxidation, and clinical performance of retrieved highly cross-linked crossfire liners after intermediate-term implantation. *J Arthroplasty.* 2010; 25:614-623.
- [22] D'Antonio JA, Sutton K. Ceramic materials as bearing surfaces for total hip arthroplasty. *J Am Acad Orthop Surg.* 2009; 17:63-68.
- [23] Bragdon CR, Kwon YM, Geller JA, et al. Minimum 6-year follow-up of highly cross-linked polyethylene in THA. *Clin Orthop Relat Res.* 2007; 465:122-127.
- [24] D'Antonio JA, Manley MT, Capello WN, et al. Five-year experience with crossfire highly cross-linked polyethylene. *Clin Orthop Relat Res.* 2005; 441:143-150.
- [25] McCalden RW, Naudie DD, Yuan X, et al. Radiographic methods for the assessment of polyethylene wear after total hip arthroplasty. *J Bone Joint Surg Am.* 2005; 87:2323-2334.
- [26] Martell JM, Verner JJ, Incavo SJ. Clinical performance of a highly cross-linked polyethylene at two years in total hip arthroplasty: A randomized prospective trial. *J Arthroplasty.* 2003; 18(suppl 1):55-59.
- [27] Urban JA, Garvin KL, Boese CK, et al. Ceramic-on-polyethylene bearing surfaces in total hip arthroplasty. Seventeen to twenty-one-year results. *J Bone Joint Surg Am.* 2001; 83:1688-1694.
- [28] Garvin KL, Hartman CW, Mangla J, et al. Wear analysis in THA utilizing oxidized zirconium and cross-linked polyethylene. *Clin Orthop Relat Res.* 2009; 467:141-145.