

· 基础研究 ·

侧卧角度对骶尾部软组织压力的有限元分析

田园^{1, 2a}, 梁慧敏¹, 程秀玲^{2b}, 高翔^{2c}, 尹梦帆^{2c}, 王春梅^{1*}

(1. 天津医科大学护理学院基础护理学教研室, 天津 300070; 2. 天津市第五中心医院 2a. 手术室; 2b. 护理部; 2c. 骨科, 天津 300450)

摘要: [目的] 构建不同侧卧角度骶尾部三维有限元模型并进行力学分析, 探讨预防深部压力性损伤的最佳侧卧翻身角度。[方法] 选取健康成年男性志愿者俯卧位骶尾部 CT 数据, 构建 0°、15°、30°、45°侧卧翻身角度下包含皮肤脂肪组织、肌肉组织、骨骼支撑垫的三维有限元模型, 设定边界条件、施加载荷, 分析骶尾部深部组织压力性损伤模型 Von Mises 应力、剪切应力及分布特征。[结果] 皮肤脂肪组织的 Von Mises 应力由小至大依次为: 30°组<15°组<0°组<45°组, 差异有统计学意义 [(5.1±0.1) kPa, (5.6±0.2) kPa, (6.1±0.1) kPa, (12.7±1.2) kPa, $P<0.001$]。肌肉组织中 Von Mises 应力由小至大依次为: 30°组<45°组<15°组<0°组, 差异有统计学意义 [(17.6±0.8) kPa, (19.3±1.4) kPa, (20.6±0.5) kPa, (22.6±1.4) kPa, $P<0.001$]。皮肤脂肪组织剪切应力由小至大依次为: 30°组<15°组<0°组<45°组, 差异有统计学意义 [(0.8±0.2) kPa, (0.9±0.1) kPa, (1.3±0.2) kPa, (2.6±0.8) kPa, $P<0.001$]。肌肉组织剪切应力由小至大依次为: 30°组<15°组<45°组<0°组, 差异有统计学意义 [(4.4±0.2) kPa, (4.4±0.2) kPa, (4.7±0.5) kPa, (5.1±0.3) kPa, $P=0.02$]。4种侧卧角度下, 肌肉组织 Von Mises 应力和剪切应力均显著大于皮肤脂肪组织, 差异有统计学意义 ($P<0.05$)。[结论] 侧卧角度为 30°时骶尾部深部组织所受 Von Mises 应力及剪切应力最小, 建议采用 30°侧卧翻身角度预防深部组织压力性损伤。

关键词: 深部组织损伤, 预防, 侧卧翻身角度, 有限元分析

中图分类号: R68 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2023) 06-0533-05

A finite element analysis on sacrococcygeal soft tissue pressure at different lateral positioning angles // TIAN Yuan^{1, 2a}, LIANG Hui-min¹, CHENG Xiu-ling^{2b}, GAO Xiang^{2c}, YIN Meng-fan^{2c}, WANG Chun-mei¹. 1. Department of Basic Nursing, School of Nursing, Tianjin Medical University, Tianjin 300070, China; 2a. Operating Room, 2b. Nursing Department, 2c. Department of Orthopedics, Tianjin Fifth Central Hospital, Tianjin, 300450, China

Abstract: [Objective] To explore the best lateral positioning angle to prevent deep pressure injury by a mechanical analysis with the three-dimensional finite element sacrococcygeal model at different lateral positioning angles. **[Methods]** The sacrococcygeal CT data of a healthy adult male volunteers in prone position were used to construct a three-dimensional finite element model, including skin adipose tissue, muscle tissue and bone at 0°, 15°, 30° and 45° lateral positioning angles. As boundary conditions were set and loads were applied, the Von Mises stress, shear stress and distribution characteristics of pressure to damage the sacrococcygeal soft tissues were measured. **[Results]** The Von Mises stress on the skin and adipose tissue were ranked in ascending order of 30° group <15° group <0° group <45° group with a statistically significant difference among them [(5.1±0.1) kPa, (5.6±0.2) kPa, (6.1±0.1) kPa, (12.7±1.2) kPa, $P<0.001$], whereas the Von Mises stress on muscle tissue were down-up in order of 30° group <45° group <15° group <0° group, which was statistically significant [(17.6±0.8) kPa, (19.3±1.4) kPa, (20.6±0.5) kPa, (22.6±1.4) kPa, $P<0.001$]. In addition, the shear stress on the skin and adipose tissue was in ascending order as 30° group <15° group <0° group <45° group, which was statistically significant [(0.8±0.2) kPa, (0.9±0.1) kPa, (1.3±0.2) kPa, (2.6±0.8) kPa, $P<0.001$], however, the shear stress on muscle tissue was ranked as 30° group <15° group <45° group <0° group with a statistically significant difference [(4.4±0.2) kPa, (4.4±0.2) kPa, (4.7±0.5) kPa, (5.1±0.3) kPa, $P=0.02$]. By comparison between tissues, both Von Mises stress and shear stress on the muscle tissue were significantly higher than those on the skin and adipose tissue under the 4 lateral positioning angles ($P<0.05$). **[Conclusion]** The Von Mises stress and shear stress on the sacrococcygeal soft tissue are the least at the lateral positioning angle of 30°, so it is recommended to use the lateral decubitus position at 30° to prevent the stress injury in the deep tissue.

Key words: deep tissue injury, prevention, lateral positioning angle, finite element analysis

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2023.06.11

作者简介: 田园, 主管护师, 硕士在读, 研究方向: 护理学, (电话)15022060403, (电子信箱)tianyuan20230114@126.com

* 通信作者: 王春梅, (电话)18002178512, (电子信箱)cmwang8543@126.com

深部组织损伤 (deep tissue injury, DTI) 是压力性损伤中最严重类型, 多发生于骨骼-肌肉交界面, 由于该界面承受强烈和持续的压力及剪切力, 因此对缺血、缺氧耐受性更差的肌肉组织首先出现坏死, 进而会迅速进展至皮下脂肪及皮肤层导致全层的压力性损伤, 但也可仅表现为深部组织坏死、溶解吸收而不出现表面组织缺损^[1]。DTI 发生率占所有压力性损伤的 9%^[2], 可导致骨髓炎、败血症甚至死亡, 若能得到有效的防治, 其发生率可减少 50%~60%^[3]。2019 年公布的《压疮/压力性损伤的预防和治疗: 临床实践指南》^[4] 中建议使用 30° 侧卧翻身预防压力性损伤, 但这一建议仅来源于皮肤与病床界面压力测量^[4], 而软组织内部应力和应变才是导致 DTI 的重要原因, 所以有学者指出仅依据来源于体表组织界面压力测量并不能反映深部组织应力应变情况^[5]。有限元分析作为一种可以模拟和分析不同负荷和干预措施条件下组织生物力学特征的一种手段, 目前已广泛应用于医学临床^[6]。本研究采用高分辨率 CT 数据建立人体不同侧卧角度骶尾部三维有限元模型, 分析内部应力变化, 为预防深部组织压力性损伤的最佳倾斜角度提供理论指导。

1 资料与方法

表 1 有限元模型的材料属性与单元类型设置

材料	弹性模量 (MPa)	剪切模量 (MPa)	泊松比 (%)	单元类型
骨骼	13 400	-	0.3	Solid187
支撑垫	0.05	-	0.3	Solid187
肌肉	0.047	-	0.49	Solid187
皮肤和脂肪	-	2	0.49	Solid187

1.2 边界条件及应力施加

本研究设置了 0°、15°、30°、45° 共 4 个骶尾部与支撑垫的接触角度, 支撑垫模型底部为固定区域, 采用固定约束以模拟刚性支撑。骶尾部与支撑垫之间设置为滑动摩擦接触, 摩擦系数为 0.37。骨骼、肌肉、皮肤和脂肪间设置为 Bonded 约束, 模型整体考虑重力作用, 方向垂直水平面向下, 重力加速度为 9.8 m/s²。

1.3 测量指标

在不同组织应力集中区域选取 6 个代表性节点, 测算不同角度下模型各组织 Von Mises 应力和剪切应力, 分析 0°、15°、30°、45° 4 种侧卧角度的骶尾部深部组织压力性损伤模型应力云图分布特征。每种状态下重复设置测量 6 次。

1.1 骶尾部有限元模型建立

选取正常 BMI 男性志愿者, 35 岁, 身高 176 cm, 体重 72 kg, 排除骶尾部骨及软组织损伤或疾病, 并签署研究同意书。取俯卧位, 采用 64 排螺旋 CT 扫描志愿者的完整骶尾部。扫描参数: 120 KV, 259 mA, 扫描层厚为 0.5 mm, 层间距为 0.5 mm, 窗高 512 px, 窗宽 512 px。将图像存储为 DICOM 格式, 导入三维重建软件 Mimics 17.0 中。通过不同组织的灰度值, 分别构建骨、肌肉组织及皮肤脂肪组织的轮廓范围。后将初步重建的模型以 STL 格式导入自动化逆向工程软件 Geomagic Studio 16.0 中, 对整体的轮廓进行光滑、平滑等处理, 以去除无效的离散的边线和单元等, 获得三维实体模型, 同时构建不同角度下的支撑垫模型。将实体模型导入到 ANSYS 20.0 软件中进行网格划分。为提高计算精度以及收敛速度, 在网格划分中需保证优越的网格质量, 在本仿真模型, 对于骨骼、肌肉、脂肪及皮肤均采用四面体网格加以划分, 支撑垫采用六面体网格划分, 获得有限元模型。为优化各部分间接触关系, 对软组织进行了细化且将各部位骨骼视为统一整体。材料属性与单元类型见表 1, 皮肤、脂肪、肌肉软组织设置为非线性材料, 骨骼、支撑垫设置为各向同性材料^[7]。

1.4 统计学方法

采用 SPSS 21.0 进行统计学分析, 计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 组间比较采用单因素方差分析, 组内比较采用配对 *T* 检验。P<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 模型验证

共建立 4 种不同侧卧角度下骶尾部三维有限元模型, 其中节点总数 1 839 985, 单元总数 13 351, 均包含骶尾部的骨骼、肌肉、脂肪以及皮肤。其中, 平卧位骶尾部应力极值和分布趋势与 Schwartz 等^[8, 9] 研究报道相一致, 证明本研究模型有效。

2.2 Von Mises 应力

不同侧卧角度骶尾部组织 Von Mises 应力测量结果见表 2。皮肤脂肪组织的 4 种角度体位 Von Mises 应力由小至大依次为：30°组<15°组<0°组<45°组，差异具有统计学意义 ($P<0.05$)，30°组和 15°组显著小于 0°组和 45°组 ($P<0.05$)。肌肉组织的 4 种角度体位 Von Mises 应力由小至大依次为：30°组<45°组<15°组<0°组，差异具有统计学意义 ($P<0.05$)。4 种卧位角度下，肌肉组织 Von Mises 应力均大于皮肤脂肪组织，差异有统计学意义 ($P<0.05$)。

2.3 剪切应力

不同侧卧角度骶尾部组织剪切应力测量结果见表 3。皮肤脂肪组织的 4 种角度体位剪切应力由小至大依次为：30°组<15°组<0°组<45°组，差异具有统计学意义 ($P<0.05$)，30°组、15°组和 0°组显著<45°组 ($P<0.05$)。肌肉组织的 4 种角度体位剪切应力由小至大依次为：30°组<15°组<45°组<0°组，差异有统计学意义 ($P<0.05$)，15°组、30°组和 45°组显著<0°组 ($P<0.05$)。4 种卧位角度下，肌肉组织剪切应力均大于皮肤脂肪组织，差异有统计学意义 ($P<0.05$)。

2.4 四组模型应力分布规律

结合不同侧卧角度的 Von mises 应力云图和剪切应力云图 (图 1、2) 可以发现，骶尾部各组织集中

应力由骶骨向髂骨及股骨大转子后侧转移的过程，当骶尾部侧倾较小或较大时，各组织局部应力均相对较大，出现较大的应力集中，而角度为 30°时，应力分布最为均匀。

表 2 不同侧卧角度骶尾部组织 Von Mises 应力测量结果 (kPa, n=6, $\bar{x} \pm s$) 与比较

体位	皮肤脂肪	肌肉	P 值
0°	6.1±0.1	22.6±1.4	<0.001
15°	5.6±0.2	20.6±0.5	<0.001
30°	5.1±0.1	17.6±0.8	<0.001
45°	12.7±1.2	19.3±1.4	0.001
P 值	<0.001	<0.001	

表 3 不同侧卧角度骶尾部组织剪切应力测量结果 (kPa, n=6, $\bar{x} \pm s$) 与比较

体位	皮肤脂肪	肌肉	P 值
0°	1.3±0.2	5.1±0.3	<0.001
15°	0.9±0.1	4.4±0.2	<0.001
30°	0.8±0.2	4.4±0.2	<0.001
45°	2.6±0.8	4.7±0.5	0.001
P 值	<0.001	0.002	

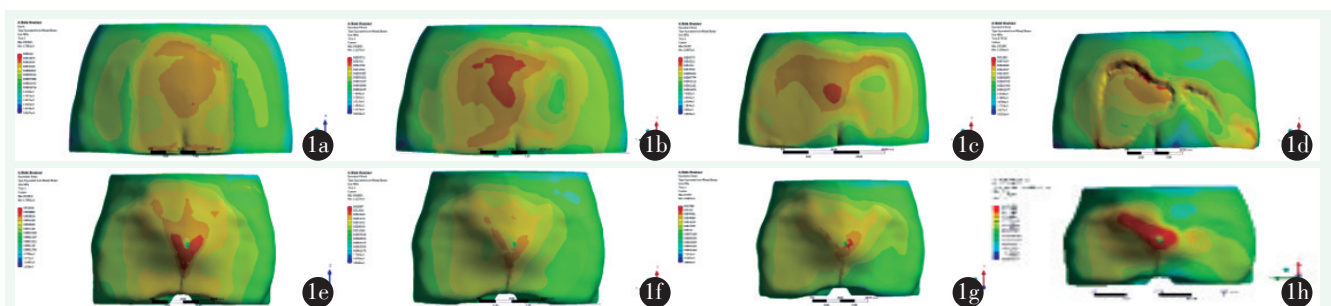


图 1 4 种卧位角度下两组织的 Von mises 应力云图 1a: 0°组皮肤脂肪 Von mises 应力云图 1b: 15°组皮肤脂肪 Von mises 应力云图 1c: 30°组皮肤脂肪 Von mises 应力云图 1d: 45°组皮肤脂肪 Von mises 应力云图 1e: 0°组肌肉 Von mises 应力云图 1f: 15°组肌肉 Von mises 应力云图 1g: 30°组肌肉 Von mises 应力云图 1h: 45°组肌肉 Von mises 应力云图

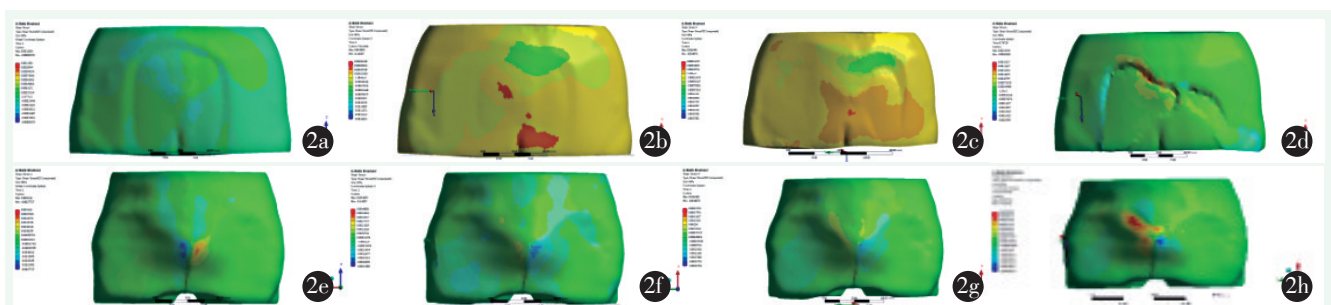


图 2 4 种卧位角度下两组织的剪切应力云图 2a: 0°组皮肤脂肪剪切应力云图 2b: 15°组皮肤脂肪剪切应力云图 2c: 30°组皮肤脂肪剪切应力云图 2d: 45°组皮肤脂肪剪切应力云图 2e: 0°组肌肉剪切应力云图 2f: 15°组肌肉剪切应力云图 2g: 30°组肌肉剪切应力云图 2h: 45°组肌肉剪切应力云图

3 讨论

骶尾部是长期卧床患者发生压力性损伤最常见的部位^[10-12]，局部组织持续受压是造成压力性损伤的重要原因^[1]。DTI 作为压力性损伤中的特殊分期，目前研究认为其发生机制主要是邻近骨突处的肌肉持续受压，导致肌肉组织发生血管阻塞和直接变形所致^[13]。避免 DTI 发生的关键在于预防^[14]，为卧床患者定期翻身可以对受压部位进行重构，是压力性损伤最简单有效的预防方法^[15]。刘江辉等^[16]证实，间歇式压力能保持组织血流灌注，减少组织损害，并能防止应激性溃疡的发生。但是，盲目随意的翻身有时反而促进压力性损伤的发生，最适宜的侧卧翻身角度度仍是护理人员长期困扰的问题。目前研究多局限于比较侧卧翻身角度度在 30°或 15°~30°与 90°之间对预防压力性损伤效果的差异^[17]，而 30°与其他侧卧角度对预防压力性损伤的效果差异尚不清楚。

有限元分析 (finite element analysis, FEA) 是一种研究复杂几何结构中力学环境的强大工具，与传统研究方法相比，FEA 可以检测深层组织的力学响应，且具有可重复性^[18, 19]。其在医学领域的广泛应用可以从生物力学角度有效解决预防压力性损伤的合理侧卧翻身角度度问题。本研究通过理论模型和有限元仿真对不同侧卧翻身角度的人体骶尾生物力学变化进行研究，并对其内部的应力应变进行了描述。

从生物力学角度看，依据组织受力特点，本研究主要将 Von Mises 应力和剪切应力作为主要检测指标。其中 Von Mises 应力代表各组织 6 个自由度下受到的应力总和的大小，Von Mises 应力越大，说明整体受力越大^[20]。剪切应力能充分体现不同组织结构间的水平剥离应力，同时也有证据表明剪切应力的存在会增加软组织损伤的易感性并产生“蠕变现象”^[21, 22]。本研究中各角度组织内部的最大应力始终发生在骨骼-肌肉界面位置，而脂肪与皮肤中相对较低，这与 Salcido 等^[23]的研究结果一致。Sari 等^[24]利用小鼠建立的计算机模型也证明了骨组织界面的深层组织内存在更大的水平剪切应力。不同侧卧翻身角度下的 Von Mises 应力也有所不同，在 30°翻身时出现了应力峰值的最低点，应力分布云图也显示侧卧翻身角度在 30°时应力最为分散，这是由于 30°侧卧可以有效避开骶骨和髂骨处的骨隆突，分散局部应力^[25]。

由此分析可知，侧卧翻身角度在 30°时骨突引起

周围软组织集中的压强相对较低，更利于减轻局部组织的内部压力以预防 DTI 的发生。同时，本研究通过生物力学角度分析了骶尾部不同组织在受压时的应力变化，为调整卧位角度预防 DTI 的发生提供了理论基础。但本研究仅为基于正常 BMI 青年男性志愿者模型下的力学分析，并未考虑因性别、年龄、疾病等导致的骶尾不同组织间厚度、弹性等差异，这些因素可能会对研究结果造成偏倚，需扩大样本量进行进一步研究。

参考文献

- [1] Kottner J, Cuddigan J, Carville K, et al. Prevention and treatment of pressure ulcers/injuries: The protocol for the second update of the international Clinical Practice Guideline 2019 [J]. *Tissue Viability*, 2019, 28 (2): 51-58.
- [2] Preston A, Rao A, Strauss R, et al. Deep tissue pressure injury: a clinical review [J]. *Am J Nurs*, 2017, 117 (5): 50-57.
- [3] Kumari S, Sharma D, Rana A, et al. Risk assessment tool for pressure ulcer development in indian surgical wards [J]. *Indian J Surg*, 2015, 77 (3): 206-212.
- [4] Defloor T. The effect of position and mattress on interface pressure [J]. *Appl Nurs Res*, 2000, 13 (1): 2-11.
- [5] Linder-Ganz E, Shabshin N, Itzchak Y, et al. Assessment of mechanical conditions in sub-dermal tissues during sitting: a combined experimental-MRI and finite element approach [J]. *J Biomech*, 2007, 40 (7): 1443-1454.
- [6] 熊华章, 斯海波, 吴元刚, 等. 有限元分析在胫骨高位截骨治疗膝内侧间室骨关节炎的研究进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2022, 30 (15): 1377-1380.
- [7] Sopher R, Nixon J, Gorecki C, et al. Exposure to internal muscle tissue loads under the ischial tuberosities during sitting is elevated at abnormally high or low body mass indices [J]. *J Biomech*, 2010, 43 (2): 280-286.
- [8] Schwartz D, Gefen A. The biomechanical protective effects of a treatment dressing on the soft tissues surrounding a non-offloaded sacral pressure ulcer [J]. *Int Wound J*, 2019, 16 (3): 684-695.
- [9] Linder-Ganz E, Shabshin N, Itzchak Y, et al. Strains and stresses in sub-dermal tissues of the buttocks are greater in paraplegics than in healthy during sitting [J]. *J Biomech*, 2008, 41 (3): 567-580.
- [10] 王海霞. 自拟生肌膏治疗骨科Ⅲ期压疮的护理体会 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2018, 26 (6): 573-574.
- [11] Chaboyer WP, Thalib L, Harbeck EL, et al. Incidence and prevalence of pressure injuries in adult intensive care patients: a systematic review and meta-analysis [J]. *Crit Care Med*, 2018, 46 (11): e1074-e1081.
- [12] Vanderwee K, Clark M, Dealey C, et al. Pressure ulcer prevalence in Europe: a pilot study [J]. *J Eval Clin Pract*, 2007, 13 (2): 227-235.

- [13] Sonenblum SE, Sprigle SH, Cathcart JM, et al. 3D anatomy and deformation of the seated buttocks [J]. *J Tissue Viability*, 2015, 24 (2): 51-61.
- [14] 董瑶, 宋玲, 刘均娥. 心血管手术患者术中压力性损伤的研究进展 [J]. *护理学杂志*, 2019, 34 (24): 15-18.
- [15] 从金霞. 术中改良体位护理对长时间侧卧位患者压疮形成的影响 [J]. *实用临床医药杂志*, 2017, 21 (10): 91-93, 100.
- [16] 刘江辉, 王维平, 王科科, 等. 两种间歇性压力对兔后肢压力性溃疡形成的影响 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2009, 23 (8): 959-963.
- [17] 陈丽娟, 孟美芬, 程雨虹, 等. 不同侧卧位角度对压力性损伤预防效果的系统评价 [J]. *当代护士 (下旬刊)*, 2021, 28 (5): 7-11.
- [18] Welch-Phillips A, Gibbons D, Ahern DP, et al. What is finite element analysis [J]. *Clin Spine Surg*, 2020, 33 (8): 323-324.
- [19] 任鹏鹏, 张启栋. 膝活动平台内侧单髁置换术后生物力学的研究进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2022, 30 (4): 329-332.
- [20] 郑利钦, 林梓凌, 何祥鑫, 等. 有限元法分析不同侧方跌倒角度下股骨颈骨折裂纹扩展的断裂力学特征 [J]. *中国组织工程研究*, 2019, 23 (8): 1203-1207.
- [21] 苏少亭, 周红海, 梁栋, 等. 腰椎关节突关节的生物力学研究进展 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2017, 27 (5): 474-479.
- [22] Elsner JJ, Gefen A. Is obesity a risk factor for deep tissue injury in patients with spinal cord injury [J]. *J Biomech*, 2008, 41 (16): 3322-3331.
- [23] Salcido R, Lee A, Ahn C. Heel pressure ulcers: purple heel and deep tissue injury [J]. *Adv Skin Wound Care*, 2011, 24 (8): 374-380.
- [24] Sari Y, Minematsu T, Huang L, et al. Establishment of a novel rat model for deep tissue injury deterioration [J]. *Int Wound J*, 2015, 12 (2): 202-209.
- [25] 李简玲, 邓敏娉, 卢婉娴. 两种不同角度侧卧在ICU斜坡卧位患者中的应用及效果评价 [J]. *当代医学*, 2017, 23 (19): 190-191.

(收稿: 2023-01-18 修回: 2023-02-08)

(同行评议专家: 王磊 崔丙军 孙海涛)

(本文编辑: 宁桦)

(上接 532 页)

- [35] De Faoite D, Ries C, Foster M, et al. Indications for bi-cruciate retaining total knee replacement: An international survey of 346 knee surgeons [J]. *PLoS One*, 2020, 15 (6): e0234616.
- [36] Cracchiolo A 3rd, Benson M, Finerman GA, et al. A prospective comparative clinical analysis of the first-generation knee replacements: polycentric vs. geometric knee arthroplasty [J]. *Clin Orthop*, 1979, 145 (145): 37-46.
- [37] Buechel FF, Pappas MJ. Long-term survivorship analysis of cruciate-sparing versus cruciate-sacrificing knee prostheses using meniscal bearings [J]. *Clin Orthop*, 1990, 260 (260): 162-169.
- [38] Pritchett JW. Patients prefer a bicruciate-retaining or the medial pivot total knee prosthesis [J]. *J Arthroplasty*, 2011, 26 (2): 224-228.
- [39] Alnachoukati OK, Emerson RH, Diaz E, et al. Modern day bicruciate-retaining total knee arthroplasty: a short-term review of 146 knees [J]. *J Arthroplasty*, 2018, 33 (8): 2485-2490.
- [40] Tsai TY, Liow MHL, Li G, et al. Bi-cruciate retaining total knee arthroplasty does not restore native tibiofemoral articular contact kinematics during gait [J]. *J Orthop Res*, 2019, 37 (9): 1929-1937.

(收稿: 2021-09-04 修回: 2022-06-29)

(同行评议专家: 张喜善 段德宇)

(本文编辑: 宁桦)