

· 基础研究 ·

股骨头坏死髂骨瓣移植与旋转截骨的有限元分析[△]

孙家豪, 马博闻, 张志广, 夏天卫, 沈计荣*

(南京中医药大学附属医院, 江苏南京 210000)

摘要: [目的] 采用有限元分析法 (fine element analysis, FEA) 比较带血管蒂髂骨瓣移植术和经股骨颈基底部旋转截骨术的生物力学差异。[方法] 将中日友好医院分型 (China-Japan Friendship Hospital, CJFH) L2 型的股骨头坏死患者 CT 数据导入 Mimics 21.0 建立股骨模型 (坏死组)。经 Geomagic 优化后, 在 Solidworks 2021 中模拟带血管蒂髂骨瓣放置股骨头内部与冠状面向前成 20° 的位置建立带血管蒂髂骨瓣移植术模型 (移植组), 模拟前旋 90° 经股骨颈基底部旋转截骨术并置入股骨颈内固定系统 (femoral neck system, FNS) 建立经股骨颈基底部旋转截骨术后模型 (截骨组)。比较三组等效应力值及位移变化情况。[结果] 坏死组股骨模型应力的峰值 69.56 MPa 最大, 集中在受力区, 其次为移植组的 59.97 MPa, 截骨组的应力峰值最小 57.91 MPa。最大位移依次为坏死组 (1.85 mm) > 移植组 (1.37 mm) > 截骨组 (1.23 mm)。[结论] 经股骨颈基底部旋转截骨术与带血管蒂髂骨瓣移植术, 均能够减少坏死区域的应力集中, 并且能够改善和恢复股骨头的内部生物力学状态。股骨颈基底部旋转截骨术对股骨头力学的改善优于带血管蒂髂骨瓣移植术。

关键词: 股骨头坏死, 带血管蒂髂骨瓣移植术, 旋转截骨术, 有限元分析, 中日友好医院分型

中图分类号: R681.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2025) 06-0528-07

Finite element analysis of iliac bone flap transplantation and rotational osteotomy for femoral head necrosis // SUN Jia-hao, MA Bo-wen, ZHANG Zhi-guang, XIA Tian-wei, SHEN Ji-rong. Affiliated Hospital, Nanjing University of Traditional Chinese Medicine, Nanjing, Jiangsu 210000, China

Abstract: [Objective] To compare the biomechanical differences between vascular pedicled iliac flap grafting and femoral neck base rotation osteotomy by fine element analysis (FEA). [Methods] The the proximal femur model (necrosis group) was established by importing the CT data of a patient with China-Japan Friendship Hospital (CJFH) type L2 femoral head necrosis into Mimics 21.0. After Geomagic optimization, the vascular pedicled iliac flap transplantation model (graft group) was established in Solidworks 2021 to simulate the position of vascular pedicled iliac flap placed inside the femoral head at 20° forward in the coronal plane. The model of femoral neck rotation osteotomy (osteotomy group) was established with 90° anterior rotation through the base of the femoral neck and fixed by femoral neck system (FNS). The mechanical changes of the three models were compared and analyzed in ANSYS 17.0. [Results] The peak stress of the femur model in the necrotic group (69.56 MPa) was the largest and concentrated in the stress region, followed by that in the graft group (59.97 MPa), and that in the osteotomy group was the smallest (57.91 MPa). The maximum displacement was in the necrotic group (1.85 mm) > the graft group (1.37 mm) > the osteotomy group (1.23 mm). [Conclusion] Both rotary osteotomy at the base of the femoral neck and vascularized iliac flap grafting can reduce stress concentration in the necrotic area, and improve and restore the internal biomechanical status of the femoral head. The femoral neck base rotation osteotomy is superior to vascular pedicled iliac flap grafting in improving the mechanics of femoral head.

Key words: femoral head necrosis, vascularized iliac flap grafting, rotary osteotomy, finite element analysis, classification of China-Japan Friendship Hospital

股骨头坏死 (osteonecrosis of the femoral head, ONFH) 好发于中青年患者, 早期发病隐匿, 呈渐进性发展^[1]。股骨颈基底部旋转截骨术是对 1976 年

Sugioka 提出的转子间旋转截骨术改良后产生的新术式^[2]。张洪教授等在国内率先报道使用股骨颈基底部旋转截骨术治疗 ONFH 的临床疗效, 结果显示, 股

DOI:10.20184/j.cnki.Issn1005-8478.100936

△基金项目:江苏省研究生实践创新计划(编号:SJCX24_0992)

作者简介:孙家豪, 硕士研究生, 研究方向:骨伤科, (电子信箱) sjhjoint@outlook.com

* 通信作者:沈计荣, (电子信箱) joint66118@sina.com

骨颈基底部旋转截骨术可改善负重区股骨头完整率，对中晚期的病例可缓解症状，提高关节功能^[3]。宋和强等^[4]研究认为，股骨颈系统（femoral neck system, FNS）应用于经股骨颈基底部旋转截骨术，可提供更优秀的生物力学稳定性，是辅助经基底部旋转截骨术治疗股骨头坏死可靠的内固定装置。

带血管蒂髂骨瓣移植通过清除坏死骨后，植入移植骨瓣，在新鲜血供和坚强力学支撑帮助下，重建股骨头内结构^[5]。李伯瑞等^[6]通过对带血运的髂骨瓣填充位置有限元分析发现，骨瓣放置的最佳位置在股骨头内部与冠状面向前成 20° 的位置，术后可获得比较理想的力学效果。

周思佳^[7]依据股骨头坏死区域将股骨头坏死分为 3 种类型：M 型、C 型和 L 型，其中 L2 型为极外侧型，其病变累及外侧柱但中央柱及内侧柱完整，此期处于负重区的塌陷和修复失衡阶段^[8]，股骨头内自我修复相对积极，是保髋手术干预的时间窗，如何选择有效的保髋术式，是目前需要解决的难题^[7]。

本研究通过有限元分析方法，从生物力学的角度模拟比较带血管蒂髂骨瓣移植术和股骨颈基底部旋转截骨术对中日友好医院分型（China-Japan Friendship Hospital, CJFH）L2 型的股骨头坏死患者的术后生物力学差异，为临床实践提供了力学数据支持。

1 资料与方法

1.1 股骨头模型建立

影像来源：临床采集 1 例左侧酒精性股骨头坏死 CJFH-L2 型患者 CT 信息。患者男性，30 岁，体重 80 kg，病史 5 年，有大量饮酒史。CT 扫描参数：层厚 1 mm，扫描范围从骨盆上缘至小粗隆下 15 cm，将 CT 数据保存为 DICOM 格式，予以原始资料拷贝。本研究获得伦理委员会的批准（批准号：2023NL-058-02），入选患者签署知情同意书。

在 Mimics Research 21.0 对 CT 图像按一定阈值进行分割，得到股骨头的粗糙模型。将股骨头粗糙模型导入 Geomagic 2017 中，建立初步几何模型，再进行降噪、祛除区域特征、磨砂等处理，得到优化后的股骨头模型，拟合曲面后将优化模型导入 SolidWorks 2021 进行组装，建立最终的术前几何模型后导入 ANSYS17.0 软件中进行材料赋值（图 1a）、形成体网格及面网格，进行有限元分析。

1.2 骨瓣移植与截骨模型建立

骨瓣移植模型建立：在 Solidworks 2021 中分别建立髂骨瓣及螺钉（直径 3.5 mm，长度 30 mm）。在

装配界面完成装配过程，将骨瓣放置于股骨头内部与冠状面向前成 20°，并以螺钉固定，最终建立分析模型（图 1b）导入 ANSYS17.0 软件中进行材料赋值、形成体网格及面网格，进行有限元分析。

截骨模型建立：股骨模型以 STEP 文件导入三维工程软件 Solid Works 2021 中，于股骨颈基底部创建横断面，截骨面垂直于股骨颈轴线，以股骨颈轴线向前旋转截骨块 90° 且坏死区转移出负重区，近端截骨面与远端截骨面对合。参照强生公司 FNS 数据建立内固定装置模型，将 FNS 模型与股骨截骨模型进行装配，参考临床固定方式置入 FNS 模型，完成最终模型的创建（图 1c）。导入 ANSYS17.0 软件中进行材料赋值、形成体网格及面网格，进行有限元分析。

1.3 设定与加载

设定：在 ANSYS 17.0 中输入皮质骨、松质骨、坏死区、内固定的材料参数，材料参数见表 1。并在分析时予各部分赋相应的材料参数，FNS 内固定装置由钛合金材料组成^[3, 4]，皮质骨及松质骨统一厚度以减少误差。模型的网格划分后单元数和节点数见表 2。

表 1. 材料参数

Table 1. Material parameters

材料名称	弹性模量	泊松比
皮质骨	16 800	0.30
松质骨	840	0.30
坏死区	332.9	0.30
钛合金	10 500	0.35
髂骨块	124.6	0.15

表 2. 三种有限元模型的节点数和单元数

Table 2. Numbers of nodes and elements in three finite element models

项目	坏死组	移植组	截骨组
节点数	101 528	241 259	160 456
单元数	60 569	159 533	89 005

加载：根据相关生物力学研究，单侧加载压力为 2.5×M（体重）×G（重力系数）×0.5 N，该患者体重为 80 kg，遂将 1 000 N 载荷引入股骨头上方负重区。将此区域位于股骨内外方向对向股骨头中心的弧度为 40°，前后方向对向股骨头中心的弧度为 80°^[9]。内固定装置与骨、螺钉与骨之间的接触面设为绑定连接，模型截骨面的接触面设为摩擦接触，并设置摩擦系数为 0.46。同时，设置股骨远端为固定界

面不可移动。

1.4 测量指标

(1) 股骨的 Von Mises 应力分布、峰值；(2) 坏死区的 Von Mises 应力分布和峰值；(3) FNS 内固定装置与移植骨瓣及螺钉的 Von Mises 应力分布和峰值；(4) 股骨的位移分布和最大位移；(5) FNS 内固定装置及移植骨瓣的位移分布和最大位移；(6) 坏死区的位移分布和最大位移；(7) 截骨组截骨面 Von Mises 应力分布、峰值和位移。

1.5 统计学方法

采用 SPSS 29.0 软件进行统计学分析。计量数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示，资料呈正态分布时，采用单因素方差分析，两两比较采用 LSD 法；资料呈非正态分布时，采用秩和检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 模型验证

基于本次研究的材料属性和边界条件所得的等效应力及位移云图，通过与现有文献研究及其试验结果来验证本次研究所建立模型的有效性。对比可见，虽等效应力及位移分布存在些许误差，但结果显示本研究中所得结果与现有研究结果较为相似^[3, 4]，由此可见，该模型具有应用价值。

2.2 等效应力值变化

从坏死组、移植组及截骨组的股骨模型的应力云图看，股骨头颈交界有较高的应力分布。

坏死组股骨模型应力的峰值 (69.56 MPa) 更为集中在受力区，而两组模拟术后的股骨应力峰值都低于坏死模型 ($P < 0.05$)。此外，截骨组的应力峰值 (57.91 MPa) 也低于移植组的应力峰值 (59.97 MPa) ($P < 0.05$)，截骨组的应力峰值出现在股骨颈截骨面与

FNS 内固定相交处，移植组的应力峰值出现在螺钉尾端，详见图 1d~1f。

坏死组坏死区的应力分布范围为 0.17~0.51 MPa；移植组为 0.17~0.59 MPa；截骨组为 0.05~0.30 MPa。对比可发现截骨组对坏死区的应力分布改善效果强于移植组。

移植骨瓣及螺钉的应力分布范围为 0.01~55.47 MPa，其应力峰值出现在螺钉与骨块相交及螺钉尾端的位置。FNS 内固定装置应力分布范围为 0.05~57.89 MPa；截骨组股骨头截骨面分布范围为 1.00~9.00 MPa；截骨组股骨颈截骨面分布范围为 1.89~56.87 MPa。

2.3 位移变化

从术前、骨瓣移植及经股骨颈基底部分旋转截骨术后的股骨位移云图看，股骨头负重区域位移最大，且向下逐层递减，详见图 1g~1i。

坏死组的最大位移为 1.85 mm，而移植组及截骨组最大位移较术前显著减少 ($P < 0.05$)，截骨组最大位移 (1.23 mm) 较移植组最大位移 (1.37 mm) 减少更多 ($P < 0.05$)。

坏死组坏死区的位移分布范围为 1.45~1.80 mm；移植组为 1.08~1.34 mm；截骨组为 0.82~1.34 mm，截骨组对坏死区位移分布的改善较移植组作用更明显，FNS 对坏死区起到的支撑作用较移植髂骨瓣更加明显。

移植骨瓣及螺钉的位移分布范围为 0.61~1.08 mm。髂骨瓣和螺钉的位移集中于移植髂骨瓣的负重区域。截骨组 FNS 内固定装置的位移分布范围为 0.17~1.18 mm，股骨颈截骨面的位移分布范围为 0.5~0.8 mm，股骨头截骨面的位移分布范围为 0.5~0.8 mm，最大位移位于内固定装置的上方最顶端。

表 3. 有限元分析结果

Table 3. Analysis results of finite elements

组别	股骨最大应力值 (MPa)	股骨最大位移 (mm)	坏死区最小-最大应力值 (MPa)	坏死区最小-最大位移 (mm)
坏死组	69.56	1.85	0.17~0.51	1.45~1.80
移植组	59.97	1.37	0.17~0.59	1.08~1.34
截骨组	57.91	1.23	0.00~0.30	0.82~1.34

3 讨论

有限元分析可以将结构复杂的人体组织分割建立三维模型，并模拟加载各种人体活动相当的载荷分析应力、形变等参数为临床提供生物力学支持^[10, 11]。保髌手术具有复杂及多样性的特点，对于其力学的分

析恰恰需要发挥有限元单元分析的优势来精确评估坏死区、皮质骨、松质骨的应力改变以及塌陷移位改变，重建股骨头坏死及保髌手术前后的股骨头内生物力学情况，对于指导临床有重要意义^[12]。目前股骨头坏死领域中有有限元分析被应用于髓心减压^[15]、钽金属棒置入^[14]、其他保髌手术^[15]。

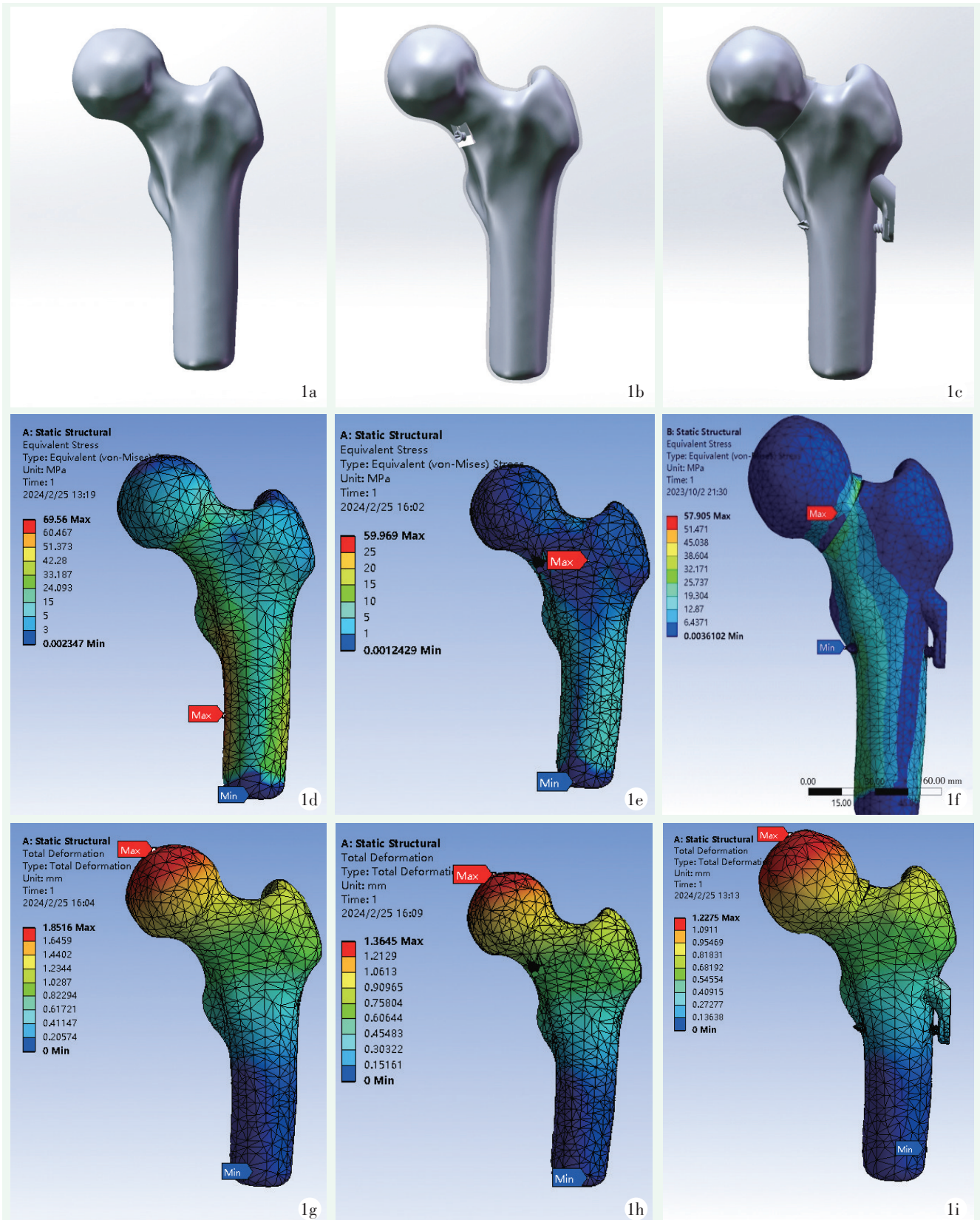


图 1. 几何模型和云图。1a: 坏死组模型; 1b: 移植组模型; 1c: 截骨组模型; 1d: 坏死组等效应力云图; 1e: 移植组等效应力云图; 1f: 截骨组等效应力云图; 1g: 坏死组位移云图; 1h: 移植组位移云图; 1i: 截骨组位移云图。

Figure 1. Geometric model and cloud diagram. 1a. Necrosis group model; 1b: Transplantation group model; 1c: Osteotomy group model; 1d: Equivalent stress nephogram of necrotic group; 1e: Equivalent stress nephogram of the transplantation group; 1f: Equivalent stress nephogram of osteotomy group; 1g: Displacement cloud image of necrotic group; 1h: Displacement cloud image of the transplantation group; 1i: Displacement cloud image of the osteotomy group.

研究表明, 股骨头外侧柱皮质部分是预防股骨头塌陷的主要生物力学支撑^[16]。此次研究所选取的为CJFH-L2型股骨头坏死患者, 此阶段坏死进展较快, 坏死面积大, 处于塌陷过程后期, 力学支撑稳定性差^[17, 18]。对比模拟两种术后模型的最大应力值和最大位移可知, 经股骨颈基底部旋转截骨术可更好地改善股骨头应力集中现象。旋转截骨术的优势在于坏死面积大同时前外侧股骨头塌陷明显的患者也可选用此术式, 该术式依赖股骨头内剩下的内侧柱和部分中间柱正常骨质, 通过旋转至负重区以重建股骨头力学传导路径, 恢复髋关节功能。文献报道内侧柱保留超过股骨头1/3的患者可采取此种保髋术式, 随访获得较好的疗效。同时该术式保留大、小转子正常解剖结构, 如果患者后期行关节置换术, 内固定物取出难度较传统转子间截骨术降低^[19, 20]。对于L2型患者, 股骨颈基底部旋转截骨术是较为合适的选择。

带血管蒂髂骨瓣移植术虽同样改善了股骨头应力集中现象, 但其改善并未达到预期水平, 且该患者坏死面积较大, 若行带血运的髂骨瓣移植术, 要求大面积清理死骨, 将对处于塌陷中的股骨头的力学稳定性造成严重打击, 难以长期保持股骨头内部生物力学稳定。该术式优势在于通过清除坏死骨, 外借带血管蒂髂骨瓣, 放置在股骨头前外侧位置, 可以缓解外侧应力, 提供足够的机械支持, 维持股骨头球形形状^[21, 22]; 同时还引入血供丰富的带旋股外侧动脉分支, 可为骨瓣提供新鲜血运, 诱导成骨细胞生成, 改善股骨头内生物学环境, 有利于恢复健康的软骨下骨, 重建负重区的力学传导路径。前期研究表明, 该术式对于坏死面积小和塌陷不明显的患者是较好的选择^[23, 24]。

综上所述, 与带血管蒂髂骨瓣移植术相比, 经股骨颈基底部旋转截骨术可更好地改善股骨头应力集中现象。在股骨头坏死治疗中, 股骨颈基底部旋转截骨术和带旋股外侧动脉分支髂骨瓣移植术目前没有直接比较的相关文献。对两种不同理念的保髋术式进行比较, 可为以后的保髋治疗提供一定参考。但需要严格把控手术适应证, 结合分期及分型、坏死面积和坏死灶部位, 综合考虑, 选择相应术式治疗。

本研究还存在一定的局限性: (1) 股骨模型材料赋值是固定的, 而且未考虑到韧带等对股骨受力的影响, 但此次研究将变量控制在最小, 术前术后的差异是有统计学意义的; (2) 仅从力学角度去对比模拟两术式的差异, 并未考虑血供、截骨块愈合等问题对术后疗效的影响; (3) 本研究模拟的髂骨瓣的植入、截

骨及内固定装置的手术过程为理想过程, 临床实践过程中较难达到; (4) 模拟术后模型的受力与患者术后真实受力是否存在差异, 也需进一步研究; (5) 研究样本数量较小, 只针对CJFH-L2型股骨头坏死的患者, 且未考虑到其他因素(患者性别差异、不同BMI等)对股骨头坏死治疗的影响; (6) 本研究只模拟静态时的负荷情况, 将对其在步态情况下、坐位等情况的负荷情况做进一步研究。

利益冲突声明 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 孙家豪: 课题设计、实施和论文写作、采集分析和解释数据、统计分析、获取研究经费及提供行政、技术或材料支持、支持性贡献; 马博闻: 采集分析和解释数据、论文写作、统计分析; 张志广: 课题设计、采集分析和解释数据; 夏天卫: 统计分析及论文审阅; 沈计荣: 分析和解释数据、论文审阅及提供行政、技术或材料支持、支持性贡献

参考文献

- [1] Cardán-Pereda A, García-Sánchez D, Terán-Villagrú N, et al. Osteonecrosis of the femoral head: a multidisciplinary approach in diagnostic accuracy [J]. *Diagnostics*, 2022, 12 (7): 1731. DOI: 10.3390/diagnostics12071731.
- [2] Sugioka Y, Hotokebuchi T, Tsutsui H. Transtrochanteric anterior rotational osteotomy for idiopathic and steroid-induced necrosis of the femoral head: indications and long-term results [J]. *Clin Orthops Relat Res*, 1992, 277: 111-120.
- [3] 肖凯, 罗殿中, 程徽, 等. 股骨颈基底部旋转截骨术治疗早期股骨头坏死的临床疗效 [J]. *中华骨科杂志*, 2018, 38 (7): 425-432. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-2352.2018.07.007. Xiao K, Luo DZ, Cheng H, et al. Clinical effect of rotary osteotomy at the base of femoral neck in the treatment of early femoral head necrosis [J]. *Chinese Journal of Orthopaedics*, 2018, 38 (7): 425-432. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-2352.2018.07.007.
- [4] 宋和强, 张大伟, 王鹏, 等. 股骨颈内固定系统固定股骨颈基底部旋转截骨的有限元分析 [J]. *生物骨科材料与临床研究*, 2023, 20 (3): 12-18. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5972.2023.03.003 Song HQ, Zhang DW, Wang P, et al. Finite element analysis of rotating osteotomy of femoral neck base fixed by femoral neck internal fixation system [J]. *Orthopaedic Biomechanics Materials and Clinical Study*, 2019, 20 (3): 12-18. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5972.2023.03.003
- [5] Sun J, Li Z, Liu S, et al. Biodegradable magnesium screw, titanium screw and direct embedding fixation in pedicled vascularized iliac bone graft transfer for osteonecrosis of the femoral head: a randomized controlled study [J]. *J Orthop Surg Res*, 2023, 18 (1): 523. DOI: 10.1186/s13018-023-04012-z.
- [6] 李伯瑞, 赵德伟, 覃开蓉, 等. 带血管蒂髂骨瓣移植治疗股骨头缺血性坏死填充位置的有限元分析 [J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2021, 14 (4): 272-277. DOI: 10.3969/j.issn.2095-9958.2021.04.07.

- Li BR, Zhao DW, Qin KR, et al. Finite element analysis of filling position in treatment of avascular necrosis of femoral head with pedicled iliac bone flap transplantation [J]. Chinese Journal of Bone and Joint Surgery, 2021, 14 (4): 272-277. DOI: 10.3969/j.issn.2095-9958.2021.04.07.
- [7] 周思佳, 姜文学. 基于 CJFH 分型的股骨头坏死三维分型及塌陷预测 [J]. 中国组织工程研究, 2018, 22 (19): 3033-3038. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.0256.
- Zhou SJ, Jiang WX. Three-dimensional classification and collapse prediction of femoral head necrosis based on CJFH classification [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2018, 22 (19): 3033-3038. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.0256.
- [8] 凌观汉, 欧志学, 姚兰, 等. 中日友好医院分型的 L 型股骨头坏死仿真三维模型建立 [J]. 中国组织工程研究, 2017, 21 (7): 1074-1079. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.2017.07.017.
- Ling GH, Ou ZX, Yao L, et al. Establishment of three-dimensional simulation model of L-type femoral head necrosis in China-Japan Friendship Hospital [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2017, 21 (7): 1074-1079. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.2017.07.017.
- [9] Brown TD, Pedersen DR, Baker KJ, et al. Mechanical consequences of core drilling and bone-grafting on osteonecrosis of the femoral head [J]. J Bone Joint Surg Am, 1993, 75 (9): 1358. DOI: 10.1016/0020-1383(93)90044-7.
- [10] 凌观汉, 李永斌, 潘学文, 等. 中日友好医院分型股骨头坏死腓骨植入治疗的三维有限元分析 [J]. 中国组织工程研究, 2020, 24 (18): 2817-2822. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.2655.
- Ling GH, Li YB, Pan XW, et al. Three-dimensional finite element analysis of treatment of femoral head necrosis and fibula implantation in China-Japan Friendship Hospital [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2020, 24 (18): 2817-2822. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.2655.
- [11] 赵豪, 高山, 陈庭瑞. 外侧壁破裂股骨粗隆间骨折三种内固定有限元分析 [J]. 中国矫形外科杂志, 2023, 31 (6): 538-542. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.06.12.
- Zhao H, Gao S, Chen TR. Finite element analysis of three kinds of internal fixation for intertrochanteric fracture of femur with lateral wall rupture [J]. Orthopedic Journal of China, 2019, 31 (6): 538-542. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.06.12.
- [12] 王宏润, 李宏宇. 有限元分析股骨头坏死的临床研究进展 [J]. 河北医学, 2020, 26 (3): 525-528. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6233.2020.03.042.
- Wang HR, Li HY. Clinical research and progress of finite element analysis of femoral head necrosis [J]. Hebei Medical Journal, 2019, 26 (3): 525-528. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6233.2020.03.042.
- [13] 杨宾宾, 刘耀升, 刘蜀彬, 等. 多种髓芯减压术治疗股骨头坏死的有限元研究 [J]. 中华损伤与修复杂志 (电子版), 2017, 12 (1): 39-45. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1673-9450.2017.01.007.
- Yang BB, Liu YS, Liu SB, et al. Finite element study of multiple core decompression in treatment of femoral head necrosis [J]. Chinese Journal of Injury Repair and Wound Healing (Electronic Edition), 2017, 12 (1): 39-45. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1673-9450.2017.01.007.
- [14] 杨宾宾, 刘耀升, 刘蜀彬. 钽金属棒置入修复股骨头坏死的三维有限元分析 [J]. 中国组织工程研究, 2016, 20 (9): 1295-1301. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.2016.09.012.
- Yang BB, Liu YS, Liu SB. Three-dimensional finite element analysis of repair of femoral head necrosis with tantalum rod implantation [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2016, 20 (9): 1295-1301. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.2016.09.012.
- [15] 庞智晖, 何伟. 基于三维重建和有限元分析的股骨头坏死围塌陷期保髋新技术的临床应用 [J]. 中华关节外科杂志 (电子版), 2013, 7 (3): 301-308. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-134X.2013.03.004.
- Pang ZH, He W. Clinical application of a new technique for hip preservation during the collapse period of femoral head necrosis based on three-dimensional reconstruction and finite element analysis [J]. Chinese Journal of Joint Surgery (Electronic Edition), 2013, 7 (3): 301-308. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-134X.2013.03.004.
- [16] 高润子, 夏天卫, 刘金柱, 等. 基于“三柱结构”的中日友好医院分型 L2 型及 L3 型股骨头坏死标本骨微结构及病理学研究 [J]. 中国修复重建外科杂志, 2022, 36 (8): 1003-1010. DOI: 10.7507/1002-1892.202203108.
- Gao RZ, Summer W, Liu JZ, et al. Study on bone microstructure and pathology of L2 and L3 femoral head necrosis specimens from China-Japan Friendship Hospital based on "three-column structure" [J]. Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery, 2019, 36 (8): 1003-1010. DOI: 10.7507/1002-1892.202203108.
- [17] 赵汝顺, 郝阳泉, 徐韩博, 等. 基于中日友好医院分型 ARCO II 期股骨头坏死的自然塌陷病程 [J]. 中国组织工程研究, 2024, 28 (30): 4871-4875. DOI: 10.12307/2024.629.
- Zhao RS, Hao YQ, Xu HB, et al. Natural collapse course of femoral bone necrosis based on ARCO II classification in China-Japan Friendship Hospital [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2019, 28 (30): 4871-4875. DOI: 10.12307/2024.629.
- [18] 范亚楠, 李文龙, 张颖, 等. 不同病因股骨头坏死的 ARCO 分期和中日友好医院分型特征研究 [J]. 中医正骨, 2020, 32 (1): 25-27.
- Fan YN, Li WL, Zhang Y, et al. Study on ARCO stages of femoral head necrosis in different etiology and its classification characteristics in China-Japan Friendship hospitals [J]. The Journal of Traditional Chinese Orthopaedics and Traumatology, 2020, 32 (1): 25-27.
- [19] 夏天卫, 魏伟, 张超, 等. 基于中日友好医院分型的股骨头坏死阶梯化保髋治疗经验总结 [J]. 中国修复重建外科杂志, 2020, 34 (1): 10-15. DOI: 10.7507/1002-1892.201904075.
- Xia TW, Wei W, Zhang C, et al. Summary of experience in stepped hip preservation treatment of femoral head necrosis based on the classification of China-Japan Friendship Hospital [J]. Chinese

- Journal of Reporative and Reconstructive Surgery, 2019, 34 (1) : 10-15. DOI: 10.7507/1002-1892.201904075.
- [20] 高润子, 夏天卫, 环大维, 等. 虚拟现实技术辅助下经股骨颈基底部旋转截骨术治疗股骨头坏死 11 例 [J]. 中国中医骨伤科杂志, 2021, 29 (5) : 51-55.
- Gao RZ, Xia TW, Huan DW, et al. Treatment of femoral head necrosis by rotating osteotomy via femoral neck base assisted by virtual reality technology: a report of 11 cases [J]. Chinese Journal of Traditional Medical Traumatology & Orthopaedics, 2021, 29 (5) : 51-55.
- [21] 殷勇, 陈玉龙, 弋石泉, 等. 带旋股外动脉升支髂骨瓣移位治疗青壮年股骨颈骨折 [J]. 中国矫形外科杂志, 2008, 16 (6) : 459-460.
- Yin Y, Chen YL, Yi SQ, et al. Treatment of femoral neck fracture in young adults with iliac crest flap transposition with ascending branch of external femoral artery rotation [J]. Orthopedic Journal of China, 2008, 16 (6) : 459-460.
- [22] 张颖, 刘又文, 魏秋实, 等. AVN 钽棒置入与带旋髂深血管蒂髂骨瓣移植治疗股骨头坏死的早期疗效对比 [J]. 中国矫形外科杂志, 2011, 19 (15) : 1311-1315. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2011.15.23.
- Zhang Y, Liu YW, Wei QS, et al. Comparison of the early efficacy of AVN tantalum rod implantation and iliac pedicle flap transplantation with deep circumflexate iliac vessel in the treatment of femoral head necrosis [J]. Orthopedic Journal of China, 2011, 19 (15) : 1311-1315. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2011.15.23.
- [23] 丁海波, 王阳, 陆芸. 带血管骨移植术治疗股骨头坏死的研究进展 [J]. 中国修复重建外科杂志, 2021, 35 (3) : 381-386. DOI: 10.7507/1002-1892.202006053.
- Ding HB, Wang Y, Lu Y. Research progress of vascularized bone transplantation in treatment of femoral head necrosis [J]. Chinese Journal of Reporative and Reconstructive Surgery, 2019, 35 (3) : 381-386. DOI: 10.7507/1002-1892.202006053.
- [24] 盛东, 宋琼, 张庆文, 等. 经髋关节外科脱位入路自体髂骨瓣打压植骨治疗中青年 ARCO II、III 期股骨头缺血性坏死 [J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2021, 36 (2) : 153-155. DOI: 10.7531/j.issn.1672-9935.2021.02.012.
- Sheng D, Song Q, Zhang QW, et al. Treatment of avascular necrosis of femoral bone in young and middle-aged patients with ARCO II and III with autogenous iliac bone flap by surgical dislocation of hip joint approach [J]. Chinese Journal of Bone and Joint Injury, 2021, 36 (2) : 153-155. DOI: 10.7531/j.issn.1672-9935.2021.02.012.
- (收稿: 2023-12-21 修回: 2024-09-18)
(同行评议专家: 张立峰, 李宏宇)
(本文编辑: 宁桦)

(上接 527 页)

- [34] Liu X, Zhou Z, Zeng WN, et al. The role of toll-like receptors in orchestrating osteogenic differentiation of mesenchymal stromal cells and osteoimmunology [J]. Front Cell Dev Biol, 2023, 11: 1277686. DOI: 10.3389/fcell.2023.1277686.
- [35] Okazaki S, Nagoya S, Matsumoto H, et al. Development of non-traumatic osteonecrosis of the femoral head requires toll-like receptor 7 and 9 stimulations and is boosted by repression on nuclear factor kappa b in rats [J]. Lab Invest, 2015, 95 (1) : 92-99. DOI: 10.1038/labinvest.2014.134.
- [36] 刘金富, 曾平, 农焦, 等. 通络生骨胶囊对激素性股骨头坏死模型大鼠 Toll 样受体 4 信号通路的影响 [J]. 中国组织工程研究, 2021, 25 (26) : 4150-4155. DOI: 10.12307/2021.113.
- Liu JF, Zeng P, Nong J, et al. Effect of tongluo shenggu capsule on toll-like receptor 4 signaling pathway in rats with steroid-induced osteonecrosis of the femoral head [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2021, 25 (26) : 4150-4155. DOI: 10.12307/2021.113.
- [37] Zhu D, Yu H, Liu P, et al. Calycosin modulates inflammation via suppressing tlr4/nf- κ b pathway and promotes bone formation to ameliorate glucocorticoid-induced osteonecrosis of the femoral head in rat [J]. Phytother Res, 2021, 35 (5) : 2824-2835. DOI: 10.1002/ptr.7028.
- [38] 陈锋, 任国武, 章晓云, 等. 核因子 κ B 受体活化因子信号转导机制与破骨细胞的活化 [J]. 中国组织工程研究, 2023, 27 (2) : 293-299. DOI: 10.12307/2022.920.
- Chen F, Ren GW, Zhang XY, et al. Receptor activator of nuclear factor- κ b ligand signal transduction mechanism and osteoclast activation [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2023, 27 (2) : 293-299. DOI: 10.12307/2022.920.
- [39] Liu Y, Shan H, Zong Y, et al. Ikke in osteoclast inhibits the progression of methylprednisolone-induced osteonecrosis [J]. Int J Biol Sci, 2021, 17 (5) : 1353-1360. DOI: 10.7150/ijbs.57962.
- [40] Wang Y, Zhan Y, Ji C, et al. Houttuynia cordata thymb repairs steroid-induced avascular necrosis of the femoral head through regulating nf- κ b signaling pathway [J]. Toxicol, 2023, 233: 107270. DOI: 10.1016/j.toxicol.2023.107270.
- (收稿: 2024-01-04 修回: 2024-08-07)
(同行评议专家: 李宏宇, 张天久, 孔维军)
(本文编辑: 宁桦)