

肱骨距螺钉尖顶距对肱骨近端骨折接骨板固定稳定性影响的有限元分析

周晨¹, 陈成¹, 曹瑞¹, 郭宏网¹, 黄陈翼², 严亮¹, 薛卫华¹

(1. 泰州市姜堰中医院骨伤科, 江苏 泰州 225599; 2. 西南医科大学附属中医医院骨伤科, 四川 泸州 646000)

【摘要】 目的: 通过有限元分析距螺钉尖顶距变化对肱骨近端骨折模型肱骨近端锁定钢板 (proximal humeral internal locking system, PHILOS) 固定稳定性的影响, 以为术中内植物尺寸的选择提供参考。方法: 在三维工程制图软件中基于 Synbone 人工骨模型构建肱骨近端三维模型, 并基于 PHILOS 钢板轮廓构建相应三维模型。通过修改模型模拟肱骨近端粉碎性骨折, 并对骨折后模型进行术式模拟, 完成固定手术模型装配, 分别将肱骨距螺钉的尖顶距设定为 4、8、12、16 mm。在垂直向下和 20° 外展条件下分别加载轴向载荷和扭转载荷完成分析求解, 在相应工况下分别计算不同模型的肱骨头最大位移、肱骨头皮质骨及松质骨的峰值应力, 以评估螺钉尖顶距变化对 PHILOS 钢板固定术后肱骨头内翻风险的影响。结果: 肱骨头的峰值位移未随距螺钉尖顶距增大而普遍上升。相反, 随着距螺钉尖顶距的逐渐增大, 各工况下肱骨头的峰值位移均出现了轻度的下降。在 20° 外展的情况下, 各模型肱骨头最大位移均明显高于垂直加载时的肱骨头最大位移。同时, 距螺钉尖顶距的延长未导致术后肱骨头的显著应力集中。松质骨峰值应力随着肱骨距螺钉尖顶距的延长而逐渐降低, 皮质骨的峰值应力呈先上升后下降的趋势, 在尖顶距为 12 mm 时, 皮质骨在各工况下的峰值应力最大, 后随着尖顶距进一步延长而降低。结论: 在肱骨头交叉锁定螺钉尖顶距 < 4 mm 的情况下, 增大肱骨距螺钉尖顶距不会导致 PHILOS 钢板固定术后稳定性的显著丢失和术后并发症发病风险的明显上升。

【关键词】 肱骨近端锁定钢板; 尖顶距; 肱骨头交叉螺钉; 肱骨距螺钉

中图分类号: R683.41

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.20230590

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Finite element analysis of influence of humerus torque screw tip distance on stability of proximal humeral fracture plate fixation

ZHOU Chen¹, CHEN Cheng¹, CAO Rui¹, GUO Hong-wang¹, HUANG Chen-yi², YAN Liang¹, XUE Wei-hua¹ (1. Department of Orthopaedics, Jiangyan Hospital of Traditional Chinese Medicine, Taizhou 225599, Jiangsu, China; 2. Department of Orthopaedics and Traumatology, Affiliated Hospital of Traditional Chinese Medicine, Southwest Medical University, Luzhou 646000, Sichuan, China)

ABSTRACT Objective To explore changes of humerus torque screw tip distance on stability of proximal humeral internal locking system (PHILOS) by finite element analysis, in order to provide reference for selection of intraoperative plant size. **Methods** The proximal humerus 3D model was constructed based on Synbone artificial bone model in 3D engineering drawing software, and the corresponding 3D model was constructed based on PHILOS bone plate contour. The model was modified to simulate comminuted proximal humerus fracture, and the operation model was simulated after fracture, and the fixed operation model was assembled, the apex distance of humerus moment screw was set as 4, 8, 12 and 16 mm respectively. The axial and torsional loads were applied under the conditions of vertical downward and 20° abduction respectively, and the maximum displacement of humeral head and the peak stress of cortical bone and cancellous bone of humeral head were calculated under the corresponding working conditions, respectively, to evaluate influence of screw tip distance change on the risk of humeral head varus after PHILOS plate fixation. **Results** The peak displacement of humerus head did not generally increase with the increase of torque screw tip distance. On the contrary, the peak displacement of humerus head decreased slightly in all working conditions with the gradual increase of torque screw tip distance. At 20° abduction, the maximum displacement of humerus head was significantly higher in all models than that under vertical loading. At the same time, the lengthening of tip distance of torque screw did not lead to significant stress concentration of the humerus head after operation. The peak stress of cancellous bone de-

基金项目: 泰州市科技局项目 (编号: TS202227)

Fund program: Taizhou Science and Technology Bureau Project (No. TS202227)

通讯作者: 陈成 E-mail: ccorthaedics@163.com

Corresponding author: CHEN Cheng E-mail: ccorthaedics@163.com

creased gradually with the extension of the peak distance of humerus moment screw, while the peak stress of cortical bone increased first and then decreased. When the peak distance was 12 mm, the peak stress of cortical bone was the largest under all working conditions, and then decreased with the further extension of the peak distance. **Conclusion** In the case of a small humeral head interlocking screw tip distance (less than 4 mm), increasing the humeral torque screw tip distance does not lead to a significant loss of stability after PHILOS plate fixation and a significant increase in the risk of postoperative complications.

KEYWORDS Proximal humeral internal locking system; Tip-apex distance; Humeral calcar screw; Humerus torque screw

肱骨近端骨折是骨质疏松患者的常见外伤^[1-2]。手术治疗是肱骨近端骨折的有效疗法,螺钉穿出和内翻是肱骨近端骨折术后的常见并发症^[3-4],会引起局部疼痛和功能障碍,影响患者康复和临床预后^[5-6],良好的内侧支撑对改善肱骨近端锁定钢板(proximal humeral internal locking system, PHILOS)固定术后的稳定性有着重要意义,肱骨距螺钉固定是维持内侧支撑的重要手段^[7-8]。螺钉尖顶距的变化会对钢板的固定稳定性产生影响^[9-10]。肱骨头交叉锁定螺钉和肱骨距螺钉尖顶距的增大,会导致肱骨近端 PHILOS 钢板固定术后稳定性的丢失,增大肱骨头内翻和固定失效的风险^[11-12]。良好的肱骨头交叉锁定螺钉固定也能为 PHILOS 钢板固定术后提供可靠的角稳定性^[2,13],但未有研究报道在不改变肱骨头交叉锁定螺钉尖顶距的前提下,调整肱骨距螺钉尖顶距是否会对 PHILOS 钢板固定术后的稳定性产生影响。本研究拟通过高仿生性三维有限元分析探讨这一问题,以期为 PHILOS 钢板固定术中螺钉长度选择提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 主要仪器和材料

模型大体外轮廓来源于 Synbone 公司肱骨近端生物力学模型。使用此种标准化人工骨模型,可以规避相关研究中的伦理问题(无须招募志愿者进行 CT 扫描,避免了电离辐射对受试者的潜在损害)^[14-15]。所有计算力学试验在图形工作站电脑(戴尔公司)内完成。

1.2 造模方法

1.2.1 完整模型重建 使用 64 排螺旋 CT,对肱骨近端(肱骨大结节下方 20 mm 范围内)模型。进行扫描^[16-17]。完成扫描后,在相应的三维模型工程制图软件中,使用工程建模的方式直接向各平面模型轮廓(既包括模型外轮廓,也包括皮质骨、松质骨的界面轮廓)。笔者前期研究^[18-19]结果表明通过这种方式可以避免逆向建模所得模型的破碎平面,提高分析效率。同时,构建与肱骨近端

模型尺寸相匹配的 PHILOS 钢板三维模型。

1.2.2 术后模型重建 骨折建模及术后模型装配同样在三维模型工程制图软件中完成。模型构建参考 Neer 分型中三部分骨折完成,具体方法:选择肱骨干骺端与肱骨头移行处(外科颈)向下 10 mm 处垂直肱骨干做一水平线,沿此线将完整的肱骨近端模型截断,后沿肱骨干冠状面斜行 50° 对大结节截骨^[5,7,20]。另参考 Sanders 方法构建肱骨距区域缺损模型(模拟粉碎性骨折)。在外科颈下方骨折线以远端 5 mm 处沿与骨折线平行的平面截骨并移除肱骨内侧 2/3 骨组织(保留内侧 1/3)^[5,7,20]。

1.3 干预措施

完成骨折模型建模后,按照 PHILOS 钢板放置标准位置重建术后模型:钢板位置位于肱骨外侧,其上端与肱骨大结节顶点的距离设定为 9 mm,内侧与结节间沟外侧的距离为 5 mm。肱骨干固定螺钉穿透对侧皮质 1 个螺纹。肱骨距螺钉置钉方向在冠状面上平行,置钉位置位于肱骨头中下 1/4 处^[20-21]。为模拟肱骨头交叉锁定螺钉的良好固定,将肱骨头所有锁定螺钉的尖顶距设为 4 mm。再在不同模型中,将肱骨距螺钉尖顶距分别设置为 4、8、12、16 mm,共构建术后模型 4 例^[5,7,20]。见图 1。

1.4 检测项目与方法

1.4.1 载荷加载 将 4 组不同肱骨距螺钉尖顶距术后模型分别导入 ANSYS WORKBENCH 20.0 A-CADEMIC R2 版本的有限元软件。为保证模型良好填充,使用不同尺寸四面体网格进行网格绘制,并对部分精细结构(如螺纹结构)进行加密^[22-23]。参照文献^[24-25]研究方法,通过调整骨性结构模型弹性模量

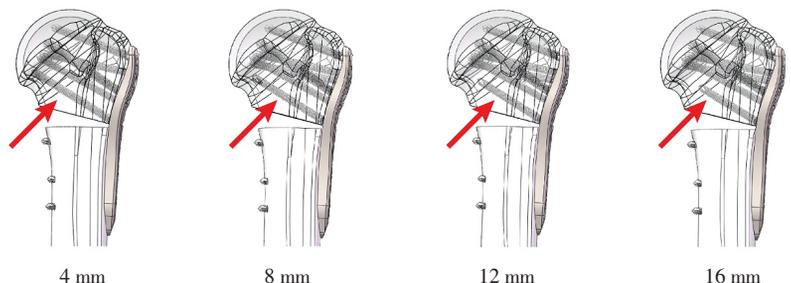


图 1 不同肱骨距螺钉尖顶距模型

Fig.1 Different numerical models with changes on calcar screw's tip-apex distance

模拟骨质疏松，将模型中所有材料均定义为各向同性均值材料，肱骨头、螺钉界面摩擦系数定义为 0.2，钢板、肱骨界面摩擦系数定义为 0.3，将其余所有界面刚度完全约束。见表 1。在肱骨下方平面约束所有自由度。在肱骨头直立、20°外展工况下加载 600 N 平行于 Z 轴压力，再在肱骨直立位于肱骨头加载 5 N·m 扭矩完成分析求解^[11,26]。见图 2。

表 1 模型材料力学属性表

Tab.1 Material properties for different components of numerical models

结构名称/材料属性	弹性模量/MPa	泊松比
皮质骨	2 000	0.30
松质骨	100	0.26
钛合金	120 000	0.31

1.4.2 检测项目 通过采集肱骨头峰值位移、肱骨头皮质骨及松质骨峰值应力评估肱骨距螺钉尖顶距变化对固定稳定性的影响。

2 结果

2.1 肱骨头最大位移变化情况

肱骨头的峰值位移并未随着肱骨距螺钉尖顶距增大而上升。与之相反，随着肱骨距螺钉尖顶距的逐渐增大，各工况下肱骨头的峰值位移均出现了轻度的下降。在 20°外展的情况下，各模型肱骨头的最大位移明显高于垂直加载时的肱骨头最大位移。见表 2，图 3。

2.2 肱骨头应力分布变化情况

肱骨头应力分布变化结果显示肱骨距螺钉尖顶距的延长不会导致固定术后应力环境的显著恶化。松质骨峰值应力随着肱骨距螺钉尖顶距的延长而逐

表 2 肱骨头最大位移量变化

Tab.2 Changes in the maximum displacement of humeral head

工况/距螺钉尖顶距	单位:mm			
	4 mm	8 mm	12 mm	16 mm
600 N 垂直	13.54	12.84	12.87	12.93
600 N+5 N·m 垂直	14.08	13.38	13.39	13.49
600 N 20°外展	48.38	47.28	47.27	47.48
600 N+5 N·m 20°外展	48.82	47.76	47.60	47.96

渐降低；皮质骨的峰值应力呈先上升后下降的趋势，在尖顶距为 12 mm 时，皮质骨在各工况下的峰值应力最大，后随着尖顶距进一步延长而降低。见表 3、表 4，图 4。

表 3 肱骨皮质骨峰值应力变化

Tab.3 Changes of peak stress in humerus cortex

工况/距螺钉尖顶距	单位:MPa			
	4 mm	8 mm	12 mm	16 mm
600 N 垂直	250.20	265.45	278.57	258.80
600 N+5 N·m 垂直	245.75	253.79	270.24	252.50
600 N 20°外展	249.22	291.33	307.32	261.65
600 N+5 N·m 20°外展	244.41	248.17	272.68	254.59

表 4 肱骨头松质骨峰值应力变化

Tab.4 Changes of peak stress in cancellous bone of humerus head

工况/距螺钉尖顶距	单位:MPa			
	4 mm	8 mm	12 mm	16 mm
600 N 垂直	40.24	32.30	25.73	26.62
600 N+5 N·m 垂直	38.61	31.55	25.83	28.06
600 N 20°外展	38.51	32.06	32.33	29.49
600 N+5 N·m 20°外展	38.14	33.91	27.84	30.21

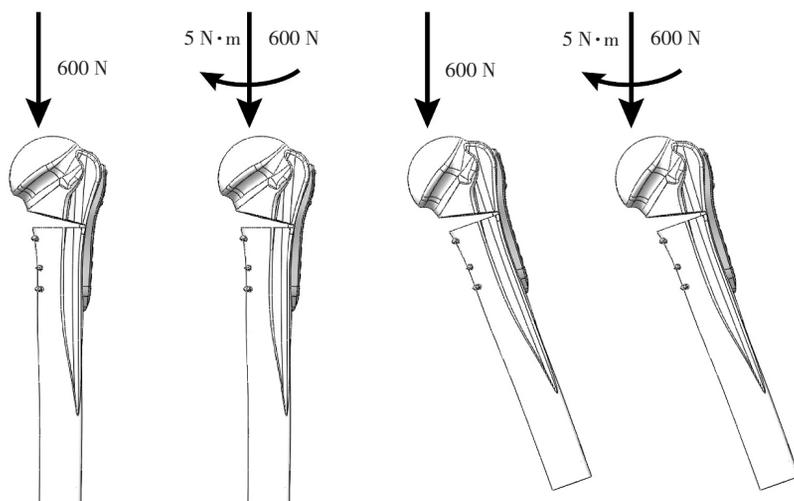


图 2 不同边界条件与加载

Fig.2 Boundary and loading conditions

3 讨论

3.1 本试验设计与研究方法的选择依据

本研究通过计算力学手段，探讨了肱骨头牢固固定的情况下，肱骨距螺钉尖顶距变化对 PHILOS 钢板固定术后稳定性的影响。传统观念认为肱骨距螺钉是改善肱骨近端骨折内侧支撑的重要手段，而内侧支撑的丢失是导致 PHILOS 钢板固定术后肱骨头内翻发病风险上升的重要原因。鉴于螺钉尖顶距是导致固定稳定性变化的经典指标，而肱骨距螺钉的牢固固定是重建内侧支

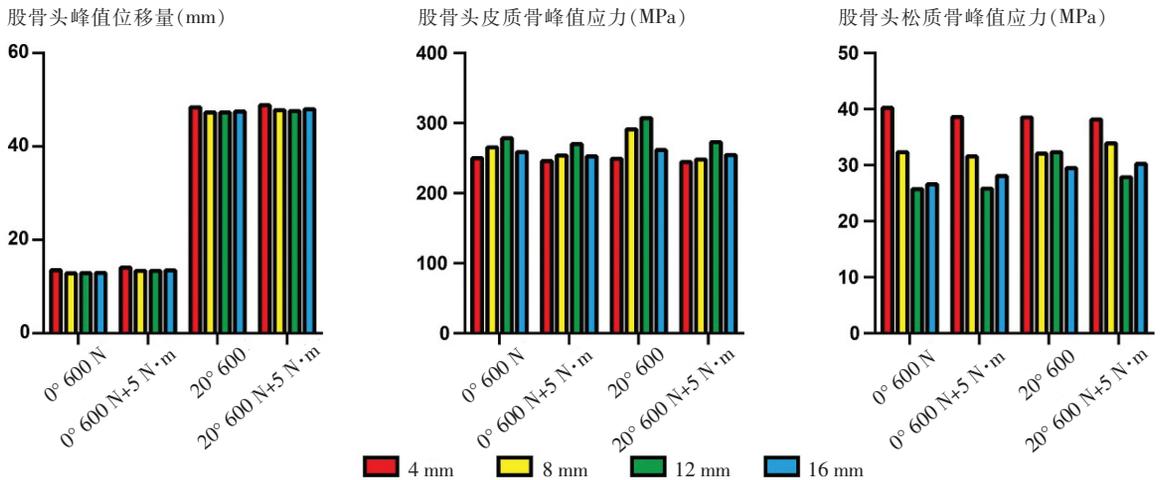


图3 不同模型分析结果

Fig.3 Computational results in different models

撑的有效手段,笔者猜想肱骨距螺钉尖顶距的变化或许会导致 PHILOS 钢板固定稳定性的明显变化。在这种思想的指导下,前期的临床工作中尝试在肱骨近端骨折患者选择相对较长的距螺钉以期重建良好的局部稳定性。这一操作会耗费较长的手术时间(尤其是内侧支撑丢失的患者,置入小尖顶肱骨距的距螺钉往往需要反复透视调整螺钉角度)。本研究为阐明这一手术操作的生物力学价值,通过三维有限元模型,计算不同肱骨距螺钉尖顶距的肱骨头模型在不同工况下峰值位移量,及肱骨头皮质、松质骨的峰值应力,作为评估内固定失效的指标^[20,27]。

受限于临床研究伦理规范,本研究未开展临床验证。在肱骨距螺钉的良好支撑是维持 PHILOS 钢板固定术后稳定性、尖顶距影响稳定性和肱骨距螺钉支撑对维持稳定性意义重大的前提下,在部分手术患者刻意使用更短的肱骨距螺钉来探讨研究主题,可能会对患者造成潜在的伤害,这与伦理学的基本原则相悖。相比之下,有限元分析可以依托于计算机数模仿真对真实状况下的受力情况进行分析模拟^[28-29]。通过标准化的模型重建和标准工况分析求解所得的生物力学指标,能在相应工况下真实地还原应力的分布情况^[18,30-31]。基于标准模型完成的有限元分析有良好的可重复性,在特定的单一模型中,可仅针对 1 个特定的变量(本研究为肱骨距螺钉尖顶距)进行调整,以排除其他协变量(如钢板位置、肱骨解剖学参数、骨折类型变化、骨密度)对结果的干扰,增加结果的可靠性。同时,本研究基于人工骨标本的建模策略有效避免了由人体临床数据建模方式带来的伦理问题,具有良好的应用前景。

3.2 本研究结果及其临床意义

目前研究认为更大的肱骨头峰值位移量与固定

稳定性的破坏之间存在密切联系,而发生于骨质的应力集中则同样被证明与骨质破坏和固定失效之间存在密切联系^[12,21,32]。因此,本研究在有限元模型中采集了肱骨头的最大位移和峰值应力指标,但结果表明当肱骨头交叉锁定螺钉的尖顶距为 4 mm 时,肱骨距螺钉尖顶距的变化不会对固定稳定性和固定术后肱骨头的应力分布产生显著的影响。基于本研究的计算结果,笔者认为肱骨头交叉锁定螺钉的短尖顶距固定是构建 PHILOS 钢板固定术后局部稳定性的有效手段,适当选择更短的肱骨距螺钉不会导致固定失效风险的显著上升。基于这一理念,在实现肱骨头良好固定的前提下,术者不过分追求肱骨距螺钉的充分支撑,这或能减少患者手术时间和失血量,促进患者康复。

同样值得注意的是,肱骨头的外展会导致相同载荷下肱骨头位移的明显上升。鉴于肱骨头位移的增大可能导致稳定性的破坏,而局部良好的稳定性对于骨折术后的骨愈合有着十分重要的作用^[13,33]。基于本研究的结果,笔者认为在 PHILOS 钢板固定术后早期应当避免肱骨外展条件下的负重,以降低术后并发症发生的风险。此外,虽然随着距螺钉尖顶距的延长,模型的峰值位移未明显变化,但皮质骨的峰值应力表现出先上升后下降,而松质骨的峰值应力表现出先下降而后上升的趋势。这可能与尖顶距变化导致的皮质、松质骨载荷分布比例的变化有关,具体的临床意义尚需后续临床研究进一步验证。

3.3 本研究不足与展望

本研究设计存在一定不足,如将肱骨头的交叉锁定螺钉的尖顶距都设定为 4 mm,这一建模方案是基于同类型研究所得结果的理想状态。实际临床工作中,难以实现在所有的螺钉中达到相同的尖

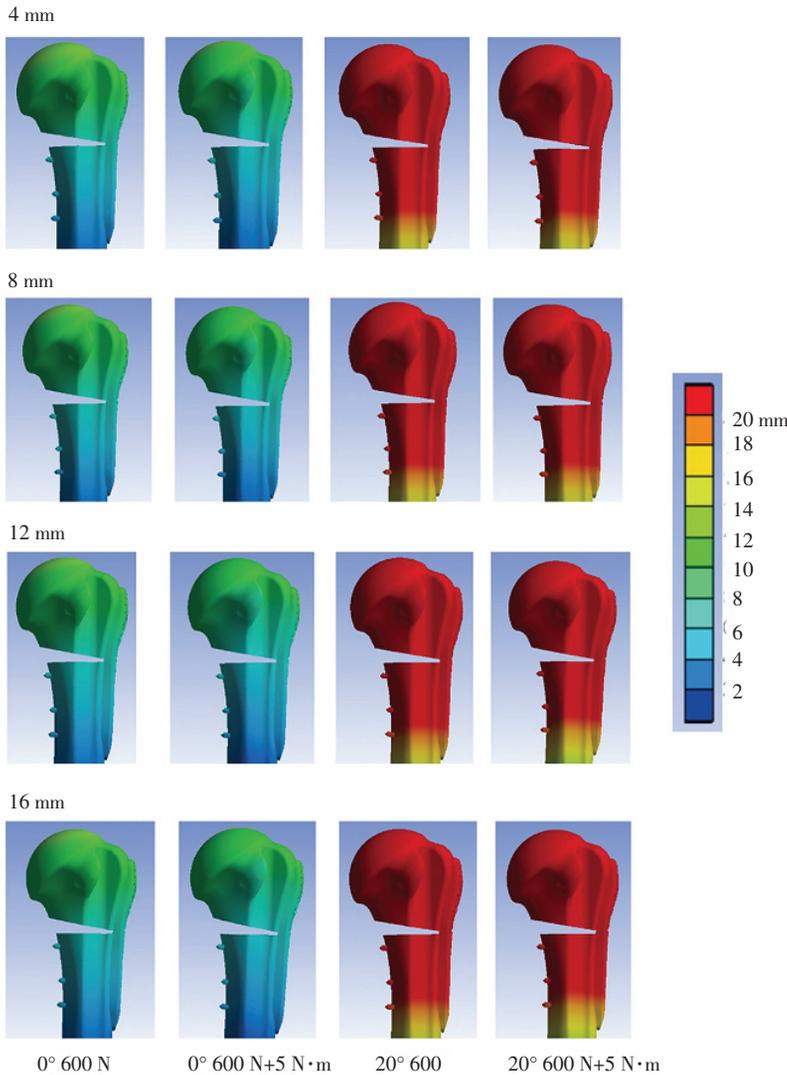


图 4 不同模型位移量云图

Fig.4 Nephograms for stress distributions in different models

顶距。而不同肱骨头锁定螺钉长度、尖顶距变化及钢板位置等术中参数的变化对 PHILOS 钢板固定术后并发症的影响,以及上述指标的变化对本研究结论的影响,均需在后续的临床和生物力学工作中进一步阐明^[34-35]。

参考文献

[1] LAUNONEN A P, LEPOLA V, SARANKO A, et al. Epidemiology of proximal humerus fractures[J]. Arch Osteoporos, 2015, 10:209.
 [2] SPROUL R C, IYENGAR J J, DEVCIC Z, et al. A systematic review of locking plate fixation of proximal humerus fractures[J]. Injury, 2011, 42(4):408-413.
 [3] HE Y, HE J L, WANG F, et al. Application of additional medial plate in treatment of proximal humeral fractures with unstable medial column:a finite element study and clinical practice [J]. Medicine, 2015, 94(41):e1775.
 [4] HE Y, ZHANG Y S, WANG Y, et al. Biomechanical evaluation of a novel dualplate fixation method for proximal humeral fractures without medial support[J]. J Orthop Surg Res, 2017, 12(1):72.

[5] KIM H, LEE W, CHOI S, et al. Role of additional inferomedial supporting screws in osteoporotic 3-part proximal humerus fracture:finite element analysis[J]. Geriatr Orthop Surg Rehabil, 2020, 11:2151459320956958.
 [6] 唐迪, 钟鸿志, 梁凯路. 锁定钢板结合异体腓骨支撑与单独锁定钢板固定治疗肱骨近端骨折疗效的 Meta 分析[J]. 中国骨伤, 2022, 35(2):186-193.
 TANG D, ZHONG H Z, LIANG K L. Locking plate fixation with fibular strut allograft versus locking plate fixation alone for the treatment of proximal humeral fractures in adults:a Meta-analysis[J]. China J Orthop Traumatol, 2022, 35(2):186-193. Chinese.
 [7] 王伟斌, 袁欣华, 扶青松, 等. 骨质疏松性肱骨近端骨折 PMMA 骨水泥强化螺钉钢板固定的有限元分析[J]. 中国骨伤, 2023, 36(3):262-267.
 WANG W B, YUAN X H, FU Q S, et al. Finite element analysis of PMMA bone cement reinforced screw plate fixation for osteoporotic proximal humeral fracture[J]. China J Orthop Traumatol, 2023, 36(3):262-267. Chinese.
 [8] 张玉富, 蒋协远. 肱骨近端骨折手术治疗的进展与思考[J]. 中国骨伤, 2023, 36(2):99-102.
 ZHANG Y F, JIANG X Y. Progress and thinking in surgical treatment of proximal humeral fracture[J]. China J Orthop Traumatol, 2023, 36(2):99-102. Chinese.
 [9] 蔡群斌, 邹霞, 胡剑涛, 等. 有限元法分析尖顶距与股骨近端防旋髓内钉固定股骨转子间骨折稳定性的关系[J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(6):831-836.
 CAI Q B, ZOU X, HU J T, et al. Relationship between tip-apex distance and stability of intertrochanteric femoral fractures with proximal femoral anti-rotation nail:a finite element analysis[J]. Chin J Tissue Eng Res, 2021, 25(6):831-836. Chinese.
 [10] CARUSO G, CORRADI N, CALDARIA A, et al. New tip-apex distance and calcare-referenced tip-apex distance cut-offs may be the best predictors for cut-out risk after intramedullary fixation of proximal femur fractures[J]. Sci Rep, 2022, 12(1):357.
 [11] FLETCHER J W A, WINDOLF M, GRÜN WALD L, et al. The influence of screw length on predicted cut-out failures for proximal humeral fracture fixations predicted by finite element simulations [J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2019, 139(8):1069-1074.
 [12] BAI L, FU Z G, AN S, et al. Effect of calcare screw use in surgical neck fractures of the proximal humerus with unstable medial support;a biomechanical study[J]. J Orthop Trauma, 2014, 28(8):452-457.
 [13] CHOI S, KANG H, BANG H. Technical tips:dualplate fixation technique for comminuted proximal humerus fractures [J]. Injury, 2014, 45(8):1280-1282.
 [14] WEIDLING M, OEFNER C, SCHOENFELDER S, et al. A novel

- parameter for the prediction of pedicle screw fixation in cancellous bone-A biomechanical study on synthetic foam[J]. *Med Eng Phys*, 2020, 79:44-51.
- [15] AMIROUCHE F, SOLITRO G F, MAGNAN B P. Stability and spine pedicle screws fixation strength-a comparative study of bone density and insertion angle [J]. *Spine Deform*, 2016, 4 (4): 261-267.
- [16] 李德国, 李洋, 尹红灵, 等. 椎体成形术填充剂最优化分布模式三维有限元分析[J]. *中国骨伤*, 2021, 34(1): 26-33.
WANG D G, LI Y, YIN H L, et al. Three dimensional finite element analysis of optimal distribution model of fillers in vertebroplasty [J]. *China J Orthop Traumatol*, 2021, 34 (1): 26-33. Chinese.
- [17] 李杰, 赵刘军, 干开丰, 等. 下颈椎两节段椎体次全切后前路椎弓根螺钉固定系统重建稳定性有限元模型的建立[J]. *中国骨伤*, 2022, 35(2): 178-185.
LI J, ZHAO L J, GAN K F, et al. Establishment of finite element model of anterior cervical transpedicular system for reconstruction of cervical stability after subtotal resection of two segments of lower cervical spine [J]. *China J Orthop Traumatol*, 2022, 35 (2): 178-185. Chinese.
- [18] LI J C, XIE Y M, SUN S L, et al. Regional differences in bone mineral density biomechanically induce a higher risk of adjacent vertebral fracture after percutaneous vertebroplasty; a case-comparative study [J]. *Int J Surg*, 2023, 109(3): 352-363.
- [19] XI Z P, XIE Y M, CHEN S, et al. The cranial vertebral body suffers a higher risk of adjacent vertebral fracture due to the poor biomechanical environment in patients with percutaneous vertebroplasty [J]. *Spine J*, 2023, 23(12): 1746-1777.
- [20] MISCHLER D, BABU S, OSTERHOFF G, et al. Comparison of optimal screw configurations in two locking plate systems for proximal humerus fixation-a finite element analysis study [J]. *Clin Biomech*, 2020, 78: 105097.
- [21] LIN T Y, YANG P, XU J L, et al. Finite element analysis of different internal fixation methods for the treatment of Pauwels type III femoral neck fracture [J]. *Biomedicine Pharmacother*, 2019, 112: 108658.
- [22] 金波, 胡云根, 韩雷. 半月板三维有限元模型建立及力学分析 [J]. *中国骨伤*, 2020, 33(8): 766-770.
JIN B, HU Y G, HAN L. Establishment of 3D finite element model of meniscus and its mechanical analysis [J]. *China J Orthop Traumatol*, 2020, 33(8): 766-770. Chinese.
- [23] 王学斌, 庞清江, 余霄. 人工股骨头置换术中置入不同直径假体球头的有限元分析 [J]. *中国骨伤*, 2020, 33(6): 558-563.
WANG X B, PANG Q J, YU X. Finite element analysis of different diameter prosthesis ball head in artificial femoral head replacement [J]. *China J Orthop Traumatol*, 2020, 33 (6): 558-563. Chinese.
- [24] AMBATI D V, WRIGHT E K Jr, LEHMAN R A Jr, et al. Bilateral pedicle screw fixation provides superior biomechanical stability in transforaminal lumbar interbody fusion: a finite element study [J]. *Spine J*, 2015, 15(8): 1812-1822.
- [25] CHU Y L, CHEN C H, TSUANG F Y, et al. Incomplete insertion of pedicle screws in a standard construct reduces the fatigue life: a biomechanical analysis [J]. *PLoS One*, 2019, 14(11): e0224699.
- [26] FLETCHER J W A, WINDOLF M, RICHARDS R G, et al. Importance of locking plate positioning in proximal humeral fractures as predicted by computer simulations [J]. *J Orthop Res*, 2019, 37(4): 957-964.
- [27] LEE J S, KIM J H, KIM K G, et al. Effect of calcar screw in locking compression plate system for osteoporotic proximal humerus fracture: a finite element analysis study [J]. *Biomed Res Int*, 2022, 2022: 1268774.
- [28] LI J C, XU C, ZHANG X Y, et al. Disc measurement and nucleus calibration in a smoothed lumbar model increases the accuracy and efficiency of in-silico study [J]. *J Orthop Surg Res*, 2021, 16 (1): 498.
- [29] XU C, XI Z P, FANG Z X, et al. Annulus calibration increases the computational accuracy of the lumbar finite element model [J]. *Global Spine J*, 2023, 13(8): 2310-2318.
- [30] LI J C, XU C, ZHANG X Y, et al. TELD with limited foraminoplasty has potential biomechanical advantages over TELD with large annuloplasty: an in-silico study [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2021, 22(1): 616.
- [31] LI J C, ZHANG X Y, XU W Q, et al. Reducing the extent of facetectomy may decrease morbidity in failed back surgery syndrome [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2019, 20(1): 369.
- [32] PADEGIMAS E M, CHANG G, NAMJOUYAN K, et al. Failure to restore the calcar and locking screw cross-threading predicts varus collapse in proximal humerus fracture fixation [J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2020, 29(2): 291-295.
- [33] HSUEH K K, FANG C K, CHEN C M, et al. Risk factors in cutout of sliding hip screw in intertrochanteric fractures: an evaluation of 937 patients [J]. *Int Orthop*, 2010, 34(8): 1273-1276.
- [34] FLETCHER J W A, WINDOLF M, RICHARDS R G, et al. Screw configuration in proximal humerus plating has a significant impact on fixation failure risk predicted by finite element models [J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2019, 28(9): 1816-1823.
- [35] JABRAN A, PEACH C, ZOU Z M, et al. Parametric design optimisation of proximal humerus plates based on finite element method [J]. *Ann Biomed Eng*, 2019, 47(2): 601-614.

(收稿日期: 2023-10-10 本文编辑: 李宜)