

基于ABAQUS的三段式螺钉的力学性能研究

胡亚兰, 陈明惠*

上海理工大学, 健康科学与工程学院, 上海

收稿日期: 2024年10月8日; 录用日期: 2024年11月1日; 发布日期: 2024年11月7日

摘要

目的: 针对骨质疏松症患者在腰椎融合内固定术后出现邻近关节退变、损伤神经血管等并发症的情况, 为此本文设计了一款三段式螺钉并通过仿真软件对手术模型进行分析。方法: 基于人体腰椎CT数据建立L3~L5腰椎有限元模型, 在腰椎模型上分别建立同尺寸的传统椎弓螺钉内固定M1模型和新型螺钉内固定M2模型, 模拟人体在屈伸、侧弯和旋转六种生理活动运动状态。分析在不同骨质下三段式螺钉的最大von Mises应力及应力分布情况、不同工况下腰椎模型活动度。结果: 在两种骨质情况下, M2模型在前屈、左右侧弯、左右轴向旋转工况下活动度更大, 与健康未植入模型更接近; 此外, 在骨质疏松情况下, M2模型螺钉在前伸、后屈、左右旋转工况下应力峰值较M1模型降低16.56%、4.67%、23.08%、22.44%。结论: 在两种骨量下, 采用三段式螺钉可以有限避免术后关节活动度过分受限引起的术后并发症; 在骨质疏松条件下, 使用三段式螺钉固定可以降低椎弓根螺钉的应力峰值, 发生断裂的风险更低。

关键词

椎弓根螺钉, 骨质疏松, 有限元分析, 生物力学

ABAQUS-Based Study of the Mechanical Properties of Three-Stage Screws

Yalan Hu, Minghui Chen*

School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Oct. 8th, 2024; accepted: Nov. 1st, 2024; published: Nov. 7th, 2024

Abstract

Objective: In order to deal with the complications such as degeneration of adjacent joints and damage to neurovascular and so on after lumbar fusion internal fixation in patients with osteoporosis, for this reason, this paper designs a three-stage screw and analyzes the surgical model by simulation software.

*通讯作者。

文章引用: 胡亚兰, 陈明惠. 基于 ABAQUS 的三段式螺钉的力学性能研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(6): 5800-5807.

DOI: 10.12677/mos.2024.136528

Methods: A finite element model of L3~L5 lumbar spine was established based on the CT data of human lumbar spine, and M1 model of traditional pedicle screw internal fixation and M2 model of new screw internal fixation of the same size were established on the lumbar spine model to simulate the six physiological activities of the human body in the flexion-extension, lateral bending and rotation movement state. The maximum von Mises stresses and stress distributions of the three-stage screws were analyzed under different bone qualities, as well as the mobility of the lumbar spine model under different working conditions. **Results:** Under two bone qualities, the M2 model had greater mobility under forward flexion, left and right lateral bending, and left and right axial rotation working conditions, which was closer to the healthy unimplanted model; moreover, under osteoporotic conditions, the peak stresses of the screws in the M2 model under anterior extension, posterior flexion, and left and right rotation working conditions were reduced by 16.56%, 4.67%, 23.08%, and 22.44% compared with that in the M1 model. **Conclusion:** The use of three-stage screws can limitedly avoid post-operative complications caused by excessive restriction of joint mobility after surgery in both bone volumes; in osteoporotic conditions, the use of three-stage screw fixation can reduce the peak stress value of pedicle screws, and the risk of fracture is lower.

Keywords

Pedicle Screws, Osteoporosis, Finite Element Analysis, Biomechanics

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

椎弓根螺钉广泛用于治疗骨折、退行性病变、滑脱、椎管狭窄、畸形、肿瘤等脊柱疾病,通过撑开、旋转、加压等方式达到有效的三维稳定,其稳定性取决于骨螺钉界面强度[1][2]。骨质疏松患者由于骨质量下降、骨组织结构脆弱,其生物力学稳定性明显下降,传统的椎弓根螺钉和手术技术难以维持原有的固定能力,容易产生松动、移位和拔出,尤其骨质疏松患者螺钉松动发生率为 0.8%~2.7%,甚至有可能超过 50.0% [3]-[5]。同时由于椎弓根附近存在重要神经血管结构的情况下,椎体破裂导致的切割产生的危害更加严重[6]。

国内外学者主要通过改变螺钉轨迹、添加骨水泥以及改进螺钉设计来增强椎弓根螺钉在骨质疏松椎体的固定强度。Santoni 等提出了皮质骨轨迹(cortical bone trajectory, CBT)置钉技术。相比传统轨迹(traditional trajectory, TT)椎弓根螺钉内固定技术,由于侵入性低,螺钉尖端与上皮质骨接触,神经血管损伤发生率低,广泛应用于后路腰椎融合术[7][8]。有试验表示,皮质骨轨迹螺钉的插入扭矩、拔出载荷和疲劳性能强,但弯曲和轴向旋转与普通椎弓根螺钉无差异。尽管皮质骨轨迹的生物力学优势强于普通的椎弓根螺钉,直径和长度较小,血管和神经损伤风险小,可较好地用于骨质疏松患者,同时可以挽救受损或失效的椎弓根螺钉[9]。但皮质骨轨迹螺钉并非严格意义上的椎弓根螺钉,且长度和直径较椎弓根螺钉小,螺钉在活动中需要承受弯曲和旋转,未来需更多功能体外试验验证其力学性能、最佳植入深度和角度,提高稳定性和安全性。骨水泥增强型螺钉是严重骨质疏松患者首选治疗措施,但仍存在热损伤、机械损伤、肺栓塞等并发症[1][3][10]。过去研究报道多关注于聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)等骨黏固剂对实心椎弓根螺钉的强化作用,并且认为 3~4 ml 的 PMMA 可以达到较好的稳定强度,并减少并发症的产生[11]。现通过更改螺钉设计,COLMAN 等提出带侧孔的空心椎弓根螺钉安全性和力学性能更好。尽管侧孔螺钉加用骨水泥时可以增加生物力学效应,减少并发症,但后期翻修手术时骨水泥的清理是无法避免的问题

[12][13]。

本文设计了一种三段式椎弓根螺钉, 可以利用两种不同螺纹产生的压缩效应来增加骨储存, 增加拔出强度, 中间段作无螺纹设计来降低椎体破裂产生的切割损伤。本文建立 L3~L5 下腰椎有限元模型, 并选择在最容易发生椎间盘突出出的 L4~L5 节段进行椎弓根螺钉单侧内固定, 将其与同尺寸传统椎弓根螺钉进行比较, 探讨新型螺钉固定的稳定性、应力分布以及对腰椎活动度(Range of motion, ROM)的影响。

2. 材料和方法

2.1. 新型三段式螺钉模型的设计

本文设计了一种新型椎弓根螺钉, 该螺钉沿整个长度具有 2° 的锥度, 使得其在任何轴向分的芯直径不大于其近端部分, 这种锥形设计确保螺钉的初始部分不会破坏过多的骨。在其近端, 螺钉具有支撑螺纹和更细的螺距, 以结合后皮质和前皮质。在螺钉插入过程中, 支撑螺纹将骨碎裂的可能性降至最低。靠近颈部的螺钉近端皮质部分约为整个螺钉长度的 $1/3$, 而远端皮质尖端为 $3\sim 4\text{ mm}$ 。螺钉接合松质骨的远端具有独特的螺纹几何形状。与近端节段相比, 其节距和外径比较大。螺钉的松质部分具有独特的外翻形状, 以增加骨接触面积。建立了同尺寸传统椎弓根螺钉进行比较, 螺钉模型如图 1 所示。

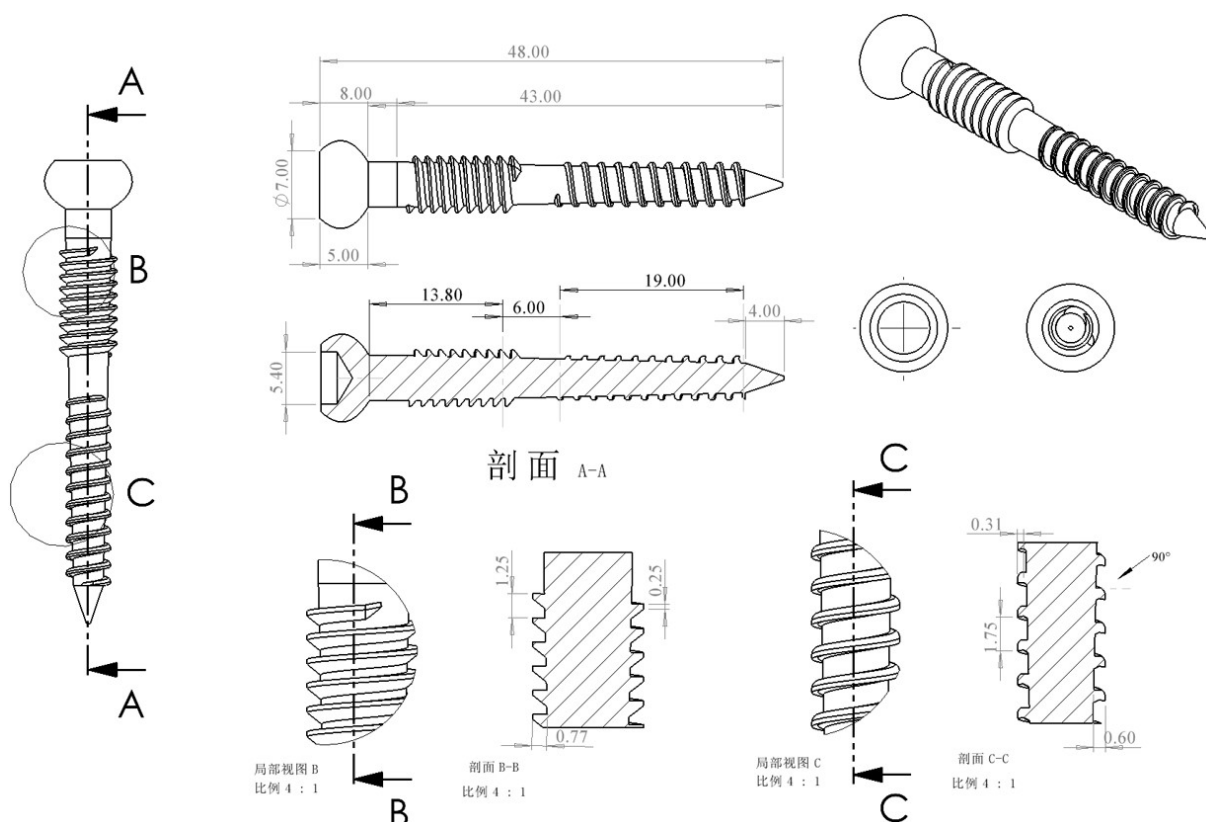


Figure 1. New three-segment pedicle screw design

图 1. 新型三段式椎弓根螺钉设计

2.2. 腰椎三维模型构建

腰椎模型采用上海某三甲医院提供的正常人体全脊柱 CT 图像, 重建初期采用 Mimics 21.0 分析软件, 使用成熟的区域增长法与灰度阈值法提取人体椎骨模型, 分割重建出 L3~L5 节段椎体模型, 建立对

应的有限元模型。使用 Geomagic wrap 2021 生成 STP 格式的实体模型, 模型中每节椎体由皮质骨、松质骨及后部结构组成, 皮质骨的平均厚度在 1 mm, 椎体上、下表面构建厚度为 0.5 mm 的软骨终板[14]。椎间盘由髓核和纤维环组成, 其中髓核约占椎间盘 43%。参照 Matsukawa 等[15]的方法, 构建全螺纹螺钉内固定模型 M1 及三段式螺钉内固定模型 M2, 如图 2 所示。

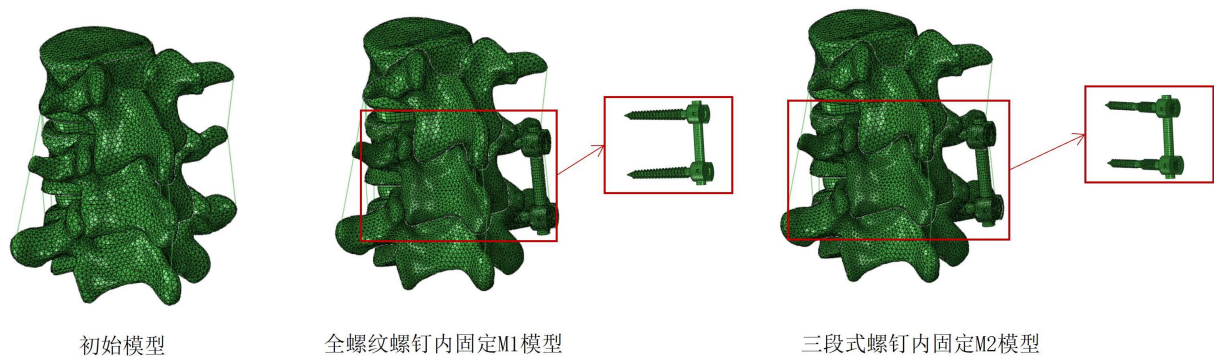


Figure 2. Initial model of lumbar L3~L5 segments and three-dimensional finite element model using different screws for internal fixation

图 2. 腰椎 L3~L5 节段的初始模型及使用不同螺钉内固定的三维有限元模型

骨质疏松材料属性通过调整材料属性进行建立, 骨质疏松材料属性的定义是松质骨的弹性模量降低 66%, 皮质骨、终板和后部结构的弹性模量降低 33%, 软组织结构保持不变[16]。通过采用线性两节点单元模拟韧带结构, 在一定程度上模拟真实韧带的生理活动, 脊柱韧带包括前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、横突间韧带、棘间韧带、棘上韧带及关节囊韧带。各组织的具体材料参数如表 1 [17] [18]。

Table 1. Material properties of the cones, discs, ligaments and internal fixation components

表 1. 椎体、椎间盘、韧带和内固定部件的材料属性

材料	弹性模量(MPa)		泊松比	截面积(mm ²)
	正常骨量	骨质疏松		
皮质骨	12,000	8060	0.3	-
松质骨	100	34	0.3	-
后部结构	3500	2345	0.2	-
终板	500		0.25	-
纤维环	4.2		0.453	-
髓核	1		0.499	-
关节软骨	25		0.25	-
前纵韧带	20		-	38
后纵韧带	70		-	20
黄韧带	50		-	60
棘上韧带	28		-	35.5
棘间韧带	28		-	35.5
横突间韧带	50		-	10
关节囊韧带	20		-	40
钛合金钉棒	110,000		0.3	-

2.3. 载荷与边界条件

约束 L5 全部 6 个自由度作为边界条件。选择 L3 上表面所有单元节点的分布耦合(该约束方式可以将参考点上的受力情况换算成平均载荷), 在上端施加 500 N 集中力模拟自重和 10 N·m 力扭矩来模拟脊柱屈伸、侧弯、轴向旋转六种生理活动运动状态。

3. 结果分析

3.1. 模型验证

各有限元模型的形状、材料属性和边界条件并不完全一致, 存在细微差异。为了最大限度地验证与参考模型中相同状态的模型, 应用了相同的加载条件进行屈伸、弯曲、扭转六种工况。取左右两侧的平均值来表示侧屈或旋转状态的 ROM。将建立的 L3~L5 三维有限元模型活动度, 与 Huang 等人[19]发表的有限元模型和 Shim 等人[20]的尸体研究进行比较, 如图 3 所示, 通过比较数据表明, 实验结果相一致, 在误差允许范围内, 表明模型是有效的。

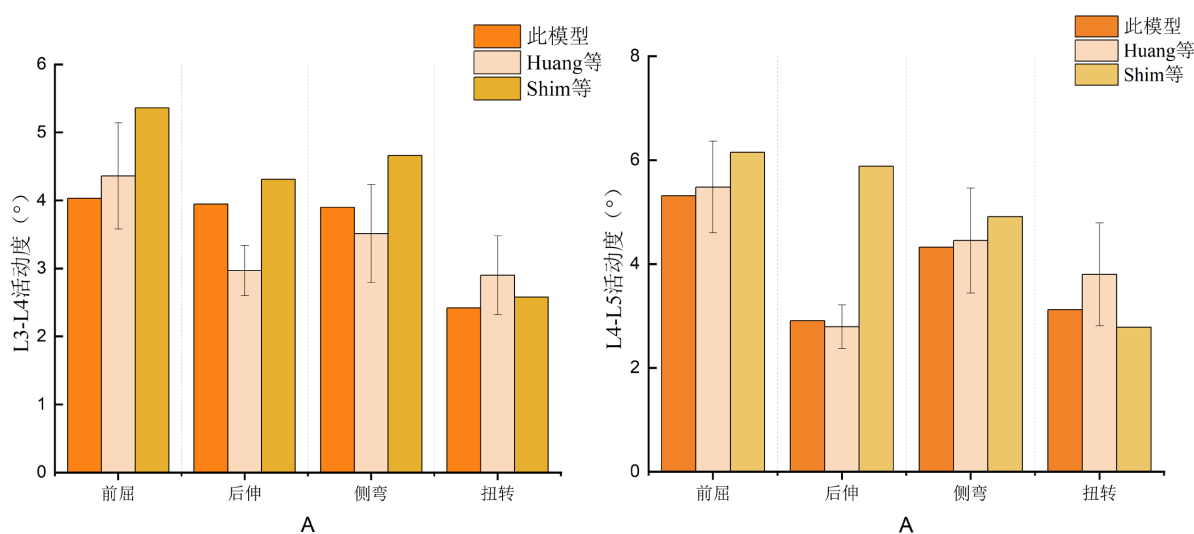


Figure 3. Finite element verification of lumbar spine

图 3. 腰椎有限元验证

3.2. 活动度对比

从图 4 中可以看出, 两种固定方式固定的腰椎在各个状态下的活动度都明显小于初始模型组的腰椎。在正常骨质下, M2 模型在前屈、左右侧弯、左右轴向旋转工况下, 较 M1 模型增加 70.16%, 5.81%, 54.72%, 4.65%, 35.37%; 在骨质疏松情况下, M2 模型在前屈、左右侧弯、左右轴向旋转工况下, 较 M1 模型增加 55.22%, 11.7%, 40.9%, 17.65%, 16.13%。在两种骨量下, 相比较使用同尺寸的传统椎弓根螺钉内固定模型, 使用三段式螺钉在除后伸工况下的活动度更大, 与健康未植入模型更接近, 这说明采用三段式螺钉可以有限避免术后关节活动度过分受限引起的术后并发症。

3.3. 植入物应力分析

在正常骨质下, M1 模型螺钉在前屈、后伸、左侧弯、右侧弯、左旋转、右旋转时的最大应力分别为 238.5、161.7、279.1、159.7、311.4、278.2 MPa; M2 模型螺钉在相应工况下最大应力分别为 260.8、182.4、258.0、200.7、282.1、327.9 MPa。在骨质疏松情况下, M1 模型螺钉在前屈、后伸、左侧弯、右侧弯、左

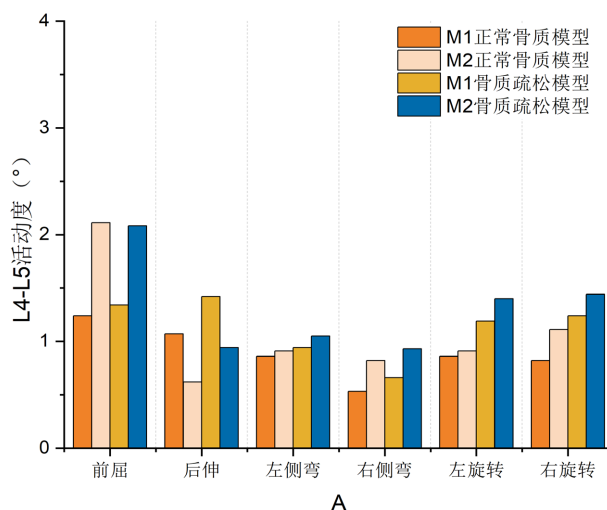


Figure 4. Comparison of L4~L5 segmental mobility in different bone qualities

图 4. 不同骨质下 L4~L5 节段活动度对比

旋转、右旋转时最大应力分别为 328.5、250.3、124.3、132.5、260、413.5 MPa；而 M2 模型螺钉在相应工况下最大应力分别为 274.1、238.6、204.2、157.2、200.0、320.7 MPa。

如图 5 所示，在正常骨质下，M2 模型螺钉最大等效应力较 M1 模型在大部分工况下明显增加。M2 组模型最大等效应力在屈伸、右侧弯、右侧轴向旋转时比 M1 组分别提高 9.35%、17.56%、25.67%、17.86%。然而，在骨质疏松情况下，M2 模型螺钉在前伸、后屈、左右旋转工况下应力峰值较 M1 模型降低 16.56%、4.67%、23.08%、22.44%。说明在骨量减小的情况下，使用三段式螺钉固定可以降低椎弓根螺钉的应力峰值，避免因日常活动造成的手术植入物断裂受损问题。

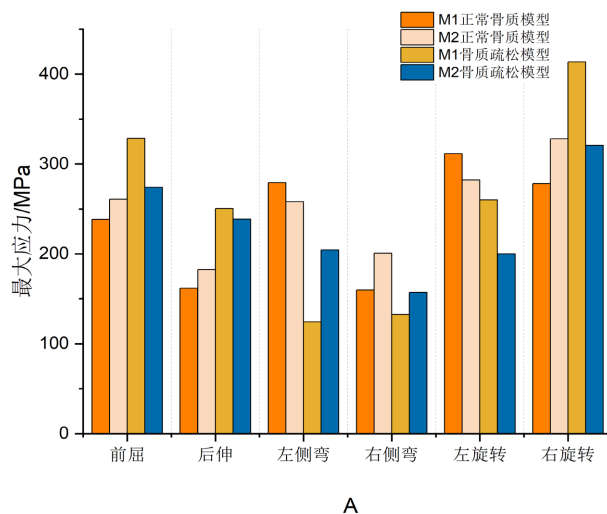


Figure 5. Comparison of maximum screw stresses under different physiological loads

图 5. 不同生理载荷下螺钉最大应力比较

4. 讨论

人体脊柱由脊椎骨及椎间盘构成，在整个人体骨骼构造中是人体躯干的支柱，有着十分重要的作用。

作为脊柱中极易受损的节段, 胸腰椎受损约占脊柱受损总数的 50%~70%, 椎弓根螺钉内固定方式则是目前应用最广泛的治疗胸腰椎受损的手术方式。对于脊柱胸腰椎骨置钉手术的临床效果与损伤分析的研究, 是通过构建内固定系统的置钉胸腰椎三维模型, 并对其进行有限元分析, 获得在脊柱不同运动状态的力学分析结果, 用以观察置钉手术效果。图 6 显示在正常骨质和骨质疏松模型下两种螺钉内固定左侧弯时应力云图, 云图中最大应力主要集中在螺钉根部钉棒, 且通过椎弓根钉受力云图可以观察到椎弓根钉钉棒的最大应力集中在椎弓根近端棒端, 侧弯状态下应力最大。本文仿真结果表明, 相比于使用传统螺钉, 在骨质疏松情况下使用三段式螺钉单侧固定进行屈伸、扭转工况时产生较小的应力响应, 应力分布更均匀, 发生断裂的风险更低。相比于在两种骨量条件下使用相同尺寸的传统椎弓根螺钉内固定模型, 三段式螺钉在前屈、侧弯、左右扭转下的活动度更接近健康未植入模型, 表明三段式螺钉的应用在一定程度上能够减少术后关节活动度过度受限, 从而降低术后并发症的发生风险。

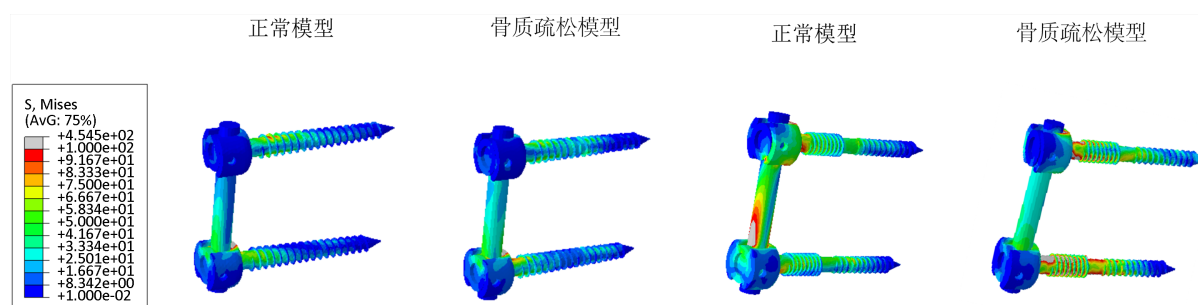


Figure 6. Stress clouds of two screws in different bone qualities during left lateral bending

图 6. 不同生理载荷下螺钉最大应力比较及左侧弯时螺钉应力云图

本研究利用有限元模型, 实现了新型三段式椎弓根螺钉体在腰椎内固定的数值仿真实验。由于本研究的数据依赖于有限元分析, 故存在一些局限性: 1) 对模拟的材料性质进行简化处理。骨质疏松模型只是在正常骨质基础上, 按照经验成比例降低弹性模量, 未考虑其他退变因素, 造成仿真数据与实际有偏差。2) 本文的三段式椎弓根螺钉是根据脊柱运动生物力学理论, 在传统椎弓根螺钉的基础上进行改良设计, 仅仅使用有限元评估其在腰椎节段的应力分布及活动度影响, 缺乏足够的生物力学体外实验进行验证, 需要在后续研究中不断完善。

5. 结论

本文利用 ABAQUS 有限元模拟软件对同尺寸传统椎弓根螺钉和三段式螺钉在正常骨质以及骨质疏松条件下在屈伸、侧弯和旋转六种生理活动运动状态下进行分析与仿真。仿真结果得出, 相比使用传统椎弓根螺钉, 在正常骨质下使用三段式椎弓根螺钉在前屈、左右侧弯、左右轴向旋转工况下, 活动度增加 70.16%, 5.81%, 54.72%, 4.65%, 35.37%; 在骨质疏松情况下, 使用三段式椎弓根螺钉的腰椎模型在同样工况下活动度增加 55.22%, 11.7%, 40.9%, 17.65%, 16.13%, 与健康未植入模型更接近。在骨质疏松情况下, 使用三段式椎弓根螺钉在前伸、后屈、左右旋转工况下应力峰值较使用传统椎弓根螺钉固定降低 16.56%、4.67%、23.08%、22.44%。证明采用三段式螺钉可以有限避免术后关节活动度过分受限引起的术后并发症, 同时在骨量减小的情况下, 使用三段式螺钉固定可以降低椎弓根螺钉的应力峰值, 避免因日常活动造成的手术植入物断裂受损问题。

参考文献

- [1] 杨文悦, 刘肖珩, 沈阳. 骨质疏松椎弓根螺钉治疗的生物力学进展[J]. 生物医学工程研究, 2020, 39(4): 408-412.

- [2] 钱蕾, 欧阳钧. 两种新型椎弓根螺钉固定强度的体外生物力学研究[J]. 医用生物力学, 2021, 36(S1): 22.
- [3] 吴龙, 谢成龙, 林仲可. 椎弓根螺钉设计与其生物力学稳定性的研究进展[J]. 脊柱外科杂志, 2019, 17(6): 431-435.
- [4] Bokov, A., Bulkin, A., Aleynik, A., Kutlaeva, M. and Mlyavikh, S. (2018) Pedicle Screws Loosening in Patients with Degenerative Diseases of the Lumbar Spine: Potential Risk Factors and Relative Contribution. *Global Spine Journal*, **9**, 55-61. <https://doi.org/10.1177/2192568218772302>
- [5] Weiser, L., Huber, G., Sellenschloh, K., Viezens, L., Püschel, K., Morlock, M.M., *et al.* (2017) Insufficient Stability of Pedicle Screws in Osteoporotic Vertebrae: Biomechanical Correlation of Bone Mineral Density and Pedicle Screw Fixation Strength. *European Spine Journal*, **26**, 2891-2897. <https://doi.org/10.1007/s00586-017-5091-x>
- [6] Yao, G., Xiao, Z., Xiao, T., Zhong, N., Huang, S., Liu, J., *et al.* (2022) Development and Biomechanical Test of a New Pedicle Screw for Thoracolumbar Spinal Surgery. *Medical Engineering & Physics*, **104**, Article ID: 103808. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2022.103808>
- [7] Kim, K., Song, M., Park, Y., Lee, D. and Kim, D. (2022) Cortical Trajectory Screw Fixation in Lumbar Spine Surgery: A Review of the Existing Literature. *Asian Spine Journal*, **16**, 127-140. <https://doi.org/10.31616/asj.2020.0575>
- [8] 赵宏涛, 杨海胜. 传统与皮质骨轨迹椎弓根螺钉内固定术的生物力学对比[J]. 医用生物力学, 2023, 38(1): 30-36.
- [9] Calvert, G.C., Lawrence, B.D., Abtahi, A.M., Bachus, K.N. and Brodke, D.S. (2015) Cortical Screws Used to Rescue Failed Lumbar Pedicle Screw Construct: A Biomechanical Analysis. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **22**, 166-172. <https://doi.org/10.3171/2014.10.spine14371>
- [10] Lorenz, A., Leichte, C.I., Frantz, S., Bumann, M., Tsiflikas, I., Shiozawa, T., *et al.* (2017) Pull out Strength of Dual Outer Diameter Pedicle Screws Compared to Uncemented and Cemented Standard Pedicle Screws: A Biomechanical *in Vitro* Study. *Orthopaedic Surgery*, **9**, 229-236. <https://doi.org/10.1111/os.12322>
- [11] Castro, W.H.M., Halm, H., Jerosch, J., Malms, J., Steinbeck, J. and Blasius, S. (1996) Accuracy of Pedicle Screw Placement in Lumbar Vertebrae. *Spine*, **21**, 1320-1324. <https://doi.org/10.1097/00007632-199606010-00008>
- [12] 郭海威, 谢家豪, 林燕平, 等. 骨水泥强化空心侧孔与常规椎弓根螺钉内固定修复骨质疏松椎体效果及安全性 Meta 分析[J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(30): 4891-4899.
- [13] Colman, M., Pond, J., Bachus, K., Lawrence, B.D., Spiker, W.R. and Brodke, D.S. (2017) Fenestrated Screws Augmented with PMMA Increase the Pullout Strength of Sacral Pedicle Screws. *Clinical Spine Surgery: A Spine Publication*, **30**, E252-E256. <https://doi.org/10.1097/bsd.0000000000000228>
- [14] Wong, C., Hu, H., Huang, Y. and Huang, K. (2022) Optimization of Spinal Reconstructions for Thoracolumbar Burst Fractures to Prevent Proximal Junctional Complications: A Finite Element Study. *Bioengineering*, **9**, Article No. 491. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9100491>
- [15] Matsukawa, K., Yato, Y., Imabayashi, H., Hosogane, N., Asazuma, T. and Nemoto, K. (2015) Biomechanical Evaluation of the Fixation Strength of Lumbar Pedicle Screws Using Cortical Bone Trajectory: A Finite Element Study. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **23**, 471-478. <https://doi.org/10.3171/2015.1.spine141103>
- [16] Polikeit, A., Nolte, L.P. and Ferguson, S.J. (2003) The Effect of Cement Augmentation on the Load Transfer in an Osteoporotic Functional Spinal Unit: Finite-Element Analysis. *Spine*, **28**, 991-996. <https://doi.org/10.1097/01.brs.0000061987.71624.17>
- [17] Kim, H., Kang, K., Chang, B., Lee, C., Kim, J. and Yeom, J.S. (2014) Biomechanical Analysis of Fusion Segment Rigidity upon Stress at both the Fusion and Adjacent Segments: A Comparison between Unilateral and Bilateral Pedicle Screw Fixation. *Yonsei Medical Journal*, **55**, Article No. 1386. <https://doi.org/10.3349/ymj.2014.55.5.1386>
- [18] Lu, T. and Lu, Y. (2019) Comparison of Biomechanical Performance among Posterolateral Fusion and Transforaminal, Extreme, and Oblique Lumbar Interbody Fusion: A Finite Element Analysis. *World Neurosurgery*, **129**, e890-e899. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2019.06.074>
- [19] Huang, Y., Du, C., Cheng, C., Zhong, Z., Chen, X., Wu, G., *et al.* (2017) Correction: Preserving Posterior Complex Can Prevent Adjacent Segment Disease Following Posterior Lumbar Interbody Fusion Surgeries: A Finite Element Analysis. *PLOS ONE*, **12**, e0172329. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172329>
- [20] Shim, C.S., Park, S.W., Lee, S., Lim, T.J., Chun, K. and Kim, D.H. (2008) Biomechanical Evaluation of an Interspinous Stabilizing Device, Locker. *Spine*, **33**, E820-E827. <https://doi.org/10.1097/brs.0b013e3181894fb1>