

骨质疏松对融合腰椎振动特性的影响

王庆东¹, 张宇², 李永健¹, 郭立新³

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 医学院, 北京 100084;

3. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 基于有限元方法, 从临床角度以应力、节段前凸角以及椎间盘高度等指标解释了骨质疏松在振动条件下对融合腰椎术的影响。通过研究发现: 当人体处于振动环境下, 实施腰椎融合术的节段可能会导致其他节段的椎骨处于不稳定的环境, 而这将导致其他节段患病、融合器失效、固定器失效以及腰椎稳定性降低的风险大幅增加。从腰椎融合术的效果来看, 骨质疏松导致融合节段的骨细胞处于更加恶劣的振动生长环境, 进而导致更差的融合结果。

关键词: 并发症; 融合结果; 腰椎间融合术; 骨质疏松; 振动

中图分类号: R 681.5; R 318.01 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)05-0095-08

Effect of Osteoporosis on Vibration Characteristics of the Fused Lumbar Spine

WANG Qing-dong¹, ZHANG Yu², LI Yong-jian¹, GUO Li-xin³

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Medicine, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WANG Qing-dong, E-mail: wqd1221@163.com)

Abstract: Based on the finite element method, the effect of osteoporosis on lumbar fusion surgery under vibration conditions was explained from a clinical perspective using such indicators as stress, segmental lordosis angle, and intervertebral disc height. It was found that when the human body is exposed to a vibrating environment, the segments undergoing lumbar fusion surgery may cause other vertebral segments to become unstable. This instability significantly increases the risk of other segments developing diseases, failure of the fusion device, failure of the fixation device, and reduced lumbar stability. From the perspective of the effectiveness of lumbar fusion surgery, osteoporosis leads to bone cells in the fusion segments being exposed to a more adverse vibrational growth environment, resulting in poorer fusion outcomes.

Key words: complication; fusion outcome; lumbar interbody fusion surgery; osteoporosis; vibration

双侧椎弓根螺钉固定装置在腰椎椎间融合手术中扮演着关键角色, 对于维持脊柱稳定、缓解疼痛以及促进骨骼愈合具有重要作用^[1]。由于接受此类手术的患者多为老年骨质疏松症患者, 骨质疏松已成为腰椎椎间融合术面临的主要难题之一^[2-3]。此外, 植入的固定装置还可能引起融合椎体骨密度的下降, 加剧骨质疏松状况^[4]。

骨质疏松症显著削弱了椎体的骨密度、生理功能和结构强度, 进而影响融合效果, 并可能引发一

系列并发症, 如退行性改变、螺钉松动、融合器移位及椎体骨折等^[5-6]。现有研究主要集中于静态负荷下骨质疏松对腰椎生物力学行为的影响, 为临床提供了重要参考。然而, 随着振动暴露的增加, 探讨振动环境下骨质疏松对融合腰椎的影响显得尤为重要。

日常生活中人们常常暴露于公共交通制造的振动环境下, 而此类最常见的振动环境会导致腰椎退化疾病、腰痛、椎间盘损伤、坐骨神经痛及其他腰椎疾病^[7]。无论是临床结果、实验结果还是

数值研究结果都表明,与静载荷相比,振动载荷会引起椎间盘应力和退行性病变的显著增加^[8].相较于健康人群,骨质疏松患者在接受腰椎融合术后更容易受到振动影响.应当特别关注骨质疏松患者在接受腰椎融合手术后,其腰椎在振动状态下的力学特性,以便采取相应的预防和保护措施,降低损伤风险.Wilke等通过体外生物力学实验,研究了振动状况对老年骨质疏松患者融合术效果的影响^[9].然而,现有研究尚未深入探讨骨质疏松对邻近节段振动特性的影响,也未全面分析骨质疏松腰椎的振动特性与融合效果及并发症之间的关联.

本文将探讨骨质疏松如何影响邻近节段和融合节段的振动特性,特别是关注其对融合效果及并发症(如邻近节段疾病、椎弓根螺钉固定器失效、融合器失效及下沉)的影响.通过这项研究,希望能够为骨质疏松患者提供更为有效的腰椎融合术的手术方案和术后管理策略,以降低并发症的风险.

1 材料和实验方法

1.1 模型建立

本文采用的模型已通过前期验证^[10].为了模拟L4-L5节段的经椎间孔腰椎椎间融合术(transforaminal lumbar interbody fusion, TLIF),对模型进行了适当调整.选择L4-L5节段作为研究对

象,主要是基于该节段在临床中具有较高的病变发生率,显著高于其他腰椎节段^[11].

为模拟经椎间孔腰椎椎间融合术(TLIF),本文对L4-L5节段进行了手术模拟,包括切除髓核、部分纤维环以及一侧的上关节突,以便于融合器的植入.通过斜侧切口进入纤维环,将尺寸为长28 mm,宽12 mm,高10 mm的融合器以斜向入路的方式植入椎间隙(图1).骨质疏松会对融合腰椎产生长期影响,所以做出如下假设:终板与融合器之间以及椎弓根螺钉与连接杆之间呈绑定状态.

众多研究成果显示,接受了双侧椎弓根螺钉固定的腰椎椎体更易出现骨质疏松的情况.本研究构建的“TLIF骨质疏松模型”(以下简称TLIF-OST模型)(如图1所示),仅将L4和L5椎体设定为处于骨质疏松状态,而其余椎体则维持健康状态.另外,本研究把健康的L1~L5腰椎模型在接受TLIF手术之后的状态简单称作“TLIF模型”(如图1所示).为了模拟出在骨质疏松条件下的TLIF腰椎模型,参考了相关文献中有关骨质疏松椎体的弹性模量数据^[12].经过设定,与健康椎体相比较,L4和L5椎体松质骨的杨氏模量以及密度均减少了66%;L4和L5椎体皮质骨的杨氏模量和密度均降低了33%(如图1所示).假设材料为均匀各向同性,椎体的具体参数见表1,其他部位的材料属性详见文献[10].

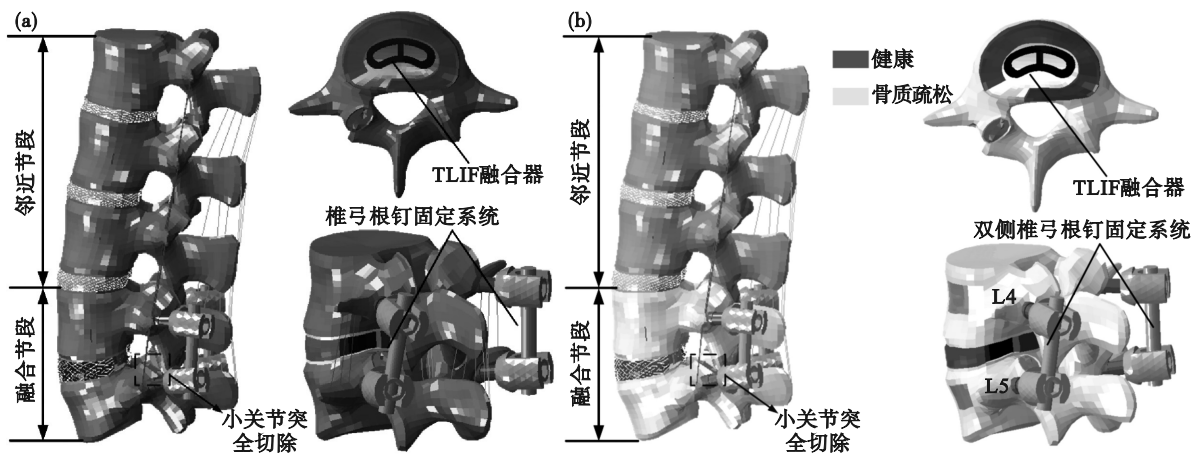


图1 TLIF有限元模型

Fig. 1 TLIF finite element models

(a)—融合椎骨未骨质疏松的TLIF腰椎模型;(b)—融合椎骨患有骨质疏松的TLIF腰椎模型.

表1 模型材料属性

Table 1 Material properties of the models

结构	单元类型	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(mg·mm ⁻³)
松质骨	C3D4	健康:100;骨质疏松:34(减少66%)	0.2	健康:1.1;骨质疏松:0.37(减少66%)
皮质骨	C3D8	健康:12 000;骨质疏松:8 040(减少33%)	0.3	健康:1.7;骨质疏松:1.14(减少66%)

1.2 边界与负载条件

为模拟人体坐姿状态,本研究将腰椎末端椎

骨设置为固定状态,如图2所示.考虑到腰椎在坐姿下承受上半身重力和肌肉力等作用力,因此在

模型上施加了 400 N 的压缩载荷^[13]. 多项研究表明,人处于坐姿时,身体所感受到的振动会持续对腰椎形成循环性的压力载荷. 基于此,本研究在 L1 椎体上表面施加了频率为 5 Hz,大小为 40 N 的正弦轴向载荷^[14]. 此外,为模拟上半身质量对 L1-L5 腰椎的影响,在 L1 椎体上表面添加了一个 40 kg 的质量点,其具体位置可参考文献^[15]. 由于模拟结果呈现出良好的周期性,本研究选取了最具代表性的 0~0.8 s 数据进行分析. 研究中引入了邻近节段椎间盘的应力、形变以及融合节段等与融合效果及并发症相关的指标. 具体参数设置参见图 2.

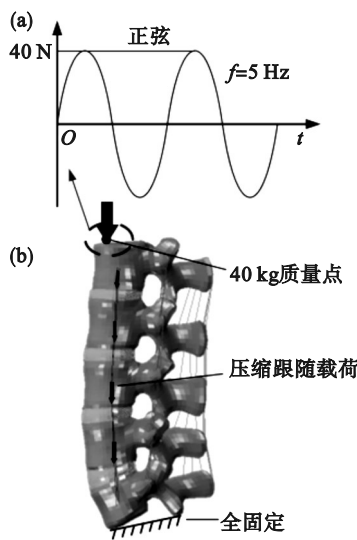


图 2 边界与负载条件

Fig. 2 Boundary and load conditions

(a)—负载类型; (b)—边界条件.

1.3 模型验证

文中模型早已被验证过^[10]. 该模型计算结果与已有的实验数据和数值计算结果一致,可用于进一步的分析.

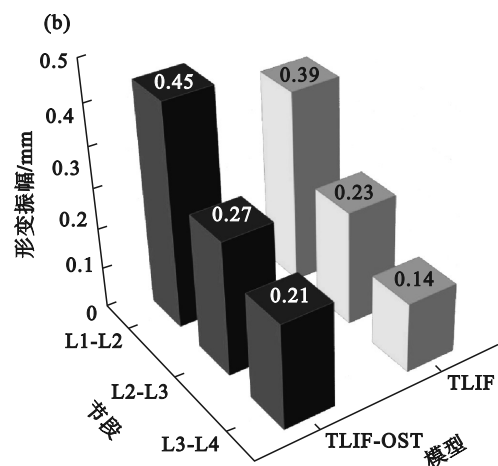
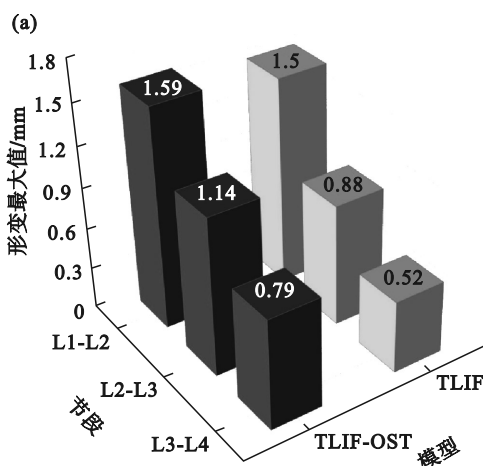
2 结果与讨论

2.1 腰椎邻近节段的结果分析

本文比较了 TLIF-OST 和 TLIF 模型在腰椎相邻节段(L1-L2, L2-L3 和 L3-L4 节段)的椎间盘结果. 在整个振动模拟过程里,两个模型纤维环基质的最大应力,无论是其所对应的最大值还是振幅,均未呈现出明显差异(图 3). 在振动模拟过程中,TLIF-OST 模型中邻近节段椎间盘的前后变形的最大值及振幅均显著高于 TLIF 模型中的相应数据. 这表明,骨质疏松条件下,邻近节段椎间盘在振动环境中表现出更大的形变波动,可能进一步增加邻近节段退变的风险.

2.2 腰椎融合节段的结果分析

在腰椎融合术中常见的并发症通常出现在融合节段,最常见的是植入器械失效. 因此本研究重点分析了振动环境下融合节段的终板应力、固定器应力以及融合器应力. 从图 4 中 L4 下终板和 L5 上终板的应力分布可以看出,TLIF-OST 模型中 L4 和 L5 终板的应力集中区域显著大于 TLIF 模型. 在整个振动模拟过程中,患有骨质疏松模型的融合节段终板的最大应力值均高于未患有骨质疏松模型的对应该数值. 具体而言,TLIF-OST 模型中 L4 和 L5 终板的最大应力值分别为 1.10 MPa(较 TLIF 模型增加 4%)和 1.30 MPa(较 TLIF 模型增加 15%),而 TLIF 模型中 L4 和 L5 终板的最大应力值分别为 1.06 MPa(基准值)和 1.13 MPa(基准值)(图 4). 这一结果表明,骨质疏松条件下,融合节段的终板应力显著增加,可能加剧融合器下沉、失效以及固定器失效等并发症的风险.



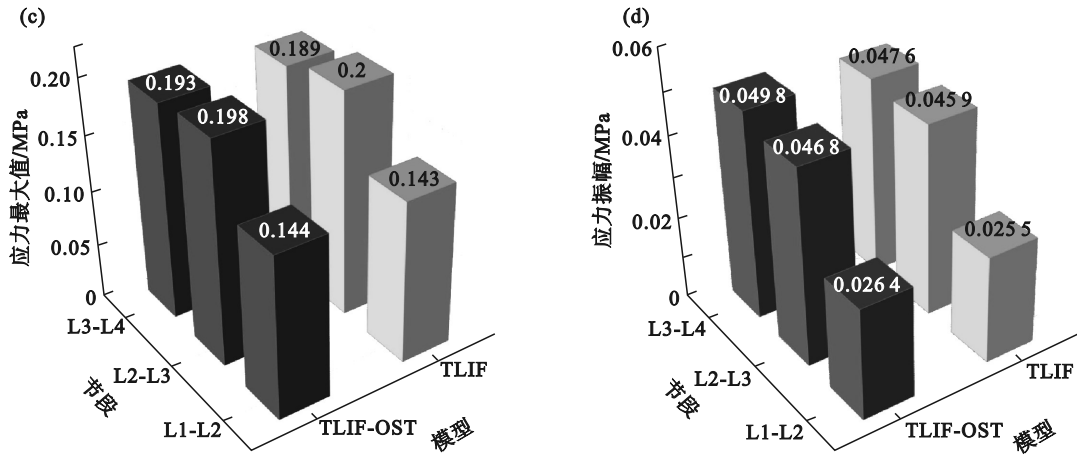


图3 模型中相邻节段的动态特性

Fig. 3 Dynamic characteristics at the adjacent segments in the models

(a)—椎间盘形变最大值; (b)—椎间盘形变振幅; (c)—椎间盘应力最大值; (d)—椎间盘应力振幅.

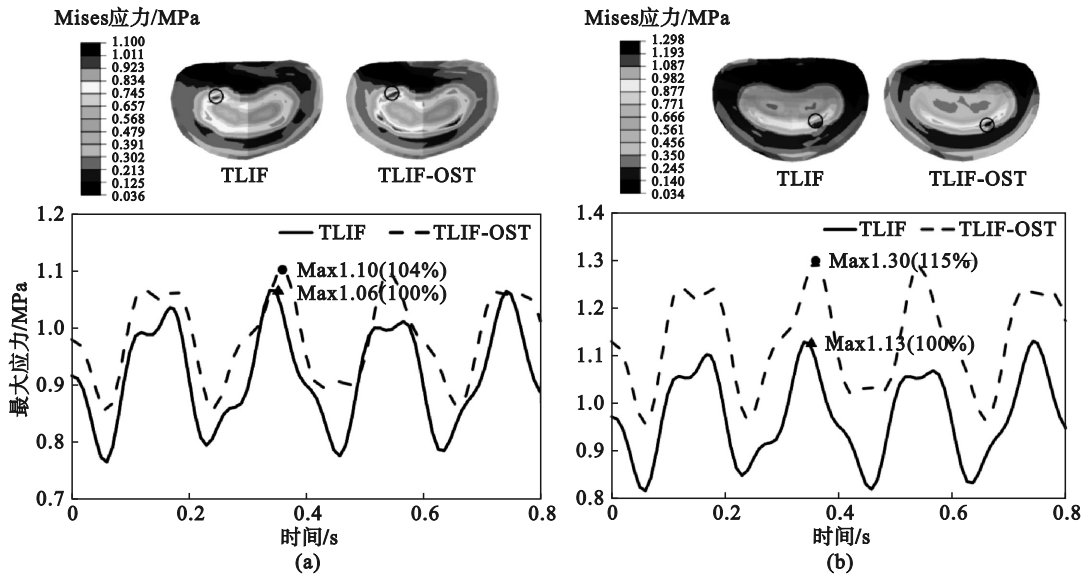


图4 模型中融合节段终板应力的动态响应

Fig. 4 Dynamic response of the stress at the fused segments in the models

(a)—L4下终板; (b)—L5上终板.

从图 5a 和图 5b 的分析结果能够清晰看出,在整个振动模拟过程中,TLIF-OST 模型里融合器的最大应力明显高于 TLIF 模型.具体而言,TLIF-OST 模型中融合器最大应力的峰值达到了 20.05 MPa,而 TLIF 模型为 17.44 MPa,相比之下增加了 15%.通过观察固定器的应力云图(图 5e),两个模型的应力集中点都位于连杆中部及螺钉头部.值得注意的是,TLIF-OST 模型中固定器的应力集中区域比 TLIF 模型更广泛,特别是连接杆部分的应力集中现象更为突出.进一步深入分析显示,在整个振动过程中,TLIF-OST 模型中固定器的最大应力值同样显著高于 TLIF 模型.比如,TLIF-OST 模型中固定器最大应力

的峰值和振幅分别为 89.90 MPa 和 25.40 MPa,相较于 TLIF 模型分别增加了 43% 和 38%(图 5c,图 5d).

本研究纳入了与术后并发症和融合效果紧密相关的某些指标,如椎间盘高度、节段性前凸角等.椎间盘高度的测量方法参照了 Drain 等的研究^[16](如图 6 所示).节段性前凸角的测量仅针对融合节段(L4-L5),压应力则定义为单位面积的平均压应力.从图 6 可以看出,在整个振动过程中,TLIF-OST 模型,呈现出更低的椎间盘高度和节段性前凸角.在椎间盘高度方面,TLIF-OST 模型的最大值为 0.309 6 mm,TLIF 模型则为 0.313 4 mm.

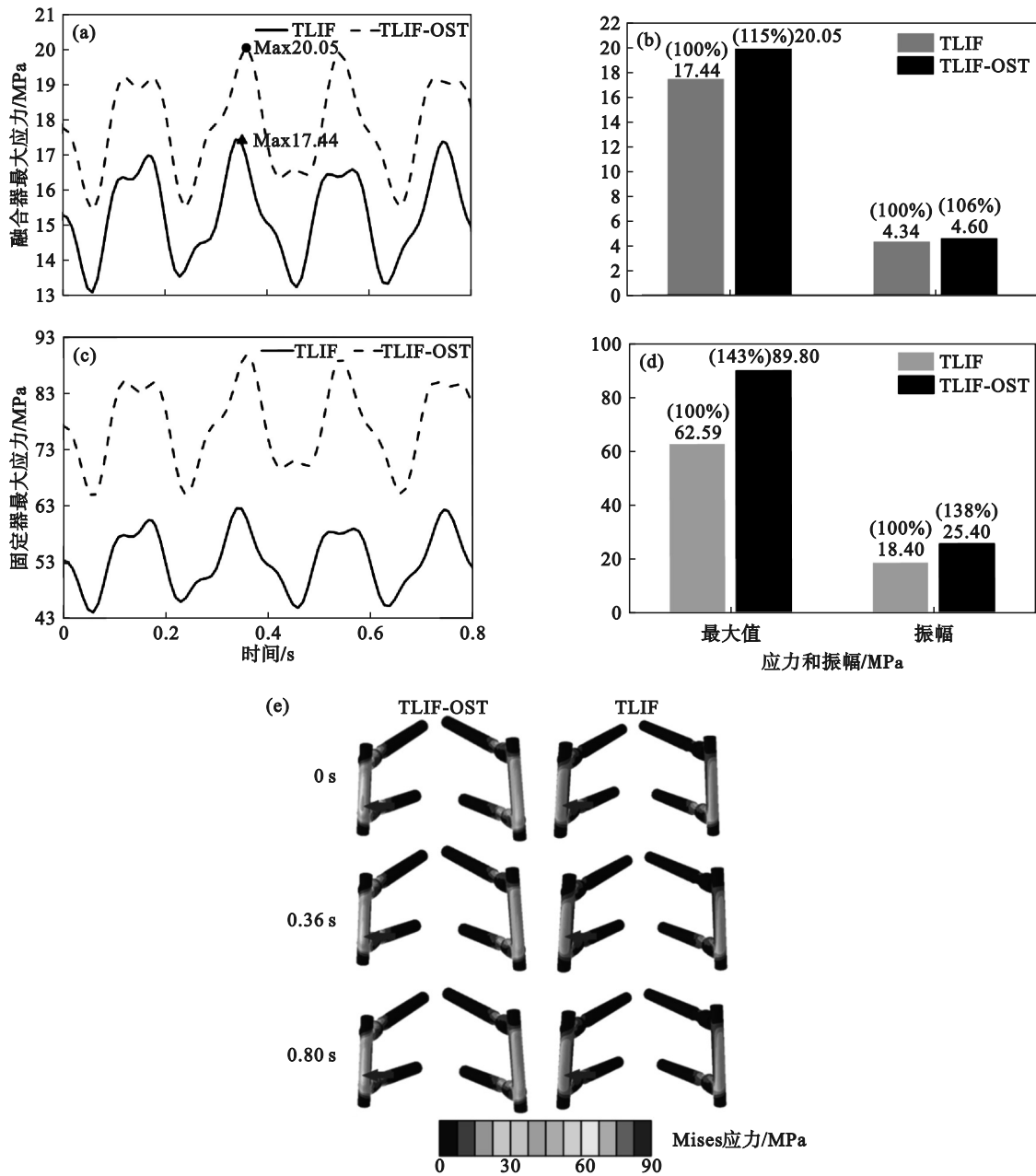


图 5 融合器和固定器中最大应力的动态响应

Fig. 5 Dynamic response of the maximum of the cage and bilateral pedicle screw fixator
 (a)—融合器最大应力动态响应; (b)—融合器最大应力和振幅; (c)—固定器最大应力动态响应;
 (d)—固定器最大应力和振幅; (e)—固定器应力分布.

对于节段性前凸角, TLIF 模型的峰值和振幅分别以 14.05°(基准值)和 0.069(基准值)为参照. 而 TLIF-OST 模型的节段性前凸角峰值和振幅分别为 13.88°, 较 TLIF 模型降低了 1.2%; 振幅为 0.104, 较 TLIF 模型增加了 51%.

为了对融合效果进行量化评估, 本研究将融合器与融合节段终板之间的压应力视为关键评价指标. 通过分析图 7 可得, 相较于 TLIF 模型, TLIF-OST 模型中 L4 下终板和 L5 上终板的压应力呈显著增加的趋势. 具体数据表明, TLIF-OST 模

型中 L4 下终板的压应力峰值为 0.417 MPa, 相较于 TLIF 模型的 0.379 MPa(基准值)增加了 10%; L5 上终板的压应力峰值为 0.388 MPa, 相较于 TLIF 模型的 0.348 MPa(基准值)增加了 11%. 此外, TLIF-OST 模型中 L4 下终板的压应力振幅为 0.110 MPa, 比 TLIF 模型的 0.100 MPa(基准值)增加了 10%; L5 上终板的压应力振幅为 0.102 MPa, 相较于 TLIF 模型的 0.093 MPa(基准值)也增加了 10%.

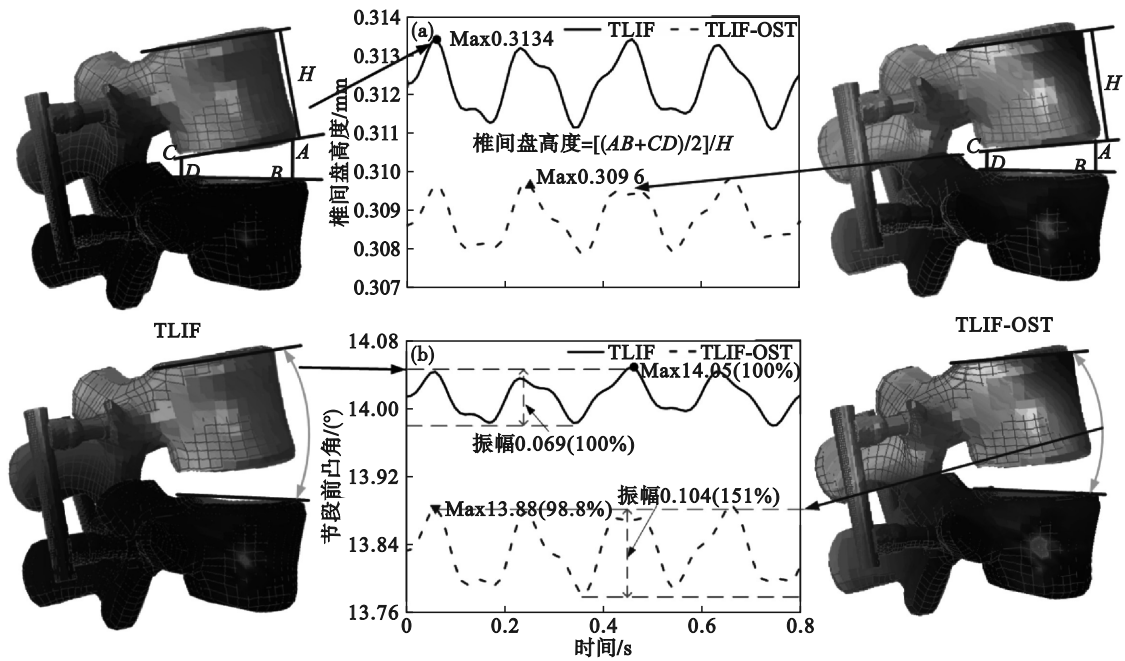


图 6 模型中 L4-L5 融合节段椎间盘高度和节段前凸角的动态响应

Fig. 6 Dynamic response of disk height and segmental lordosis at L4-L5 fused segments in the models

(a)—椎间盘高度; (b)—节段前凸角.

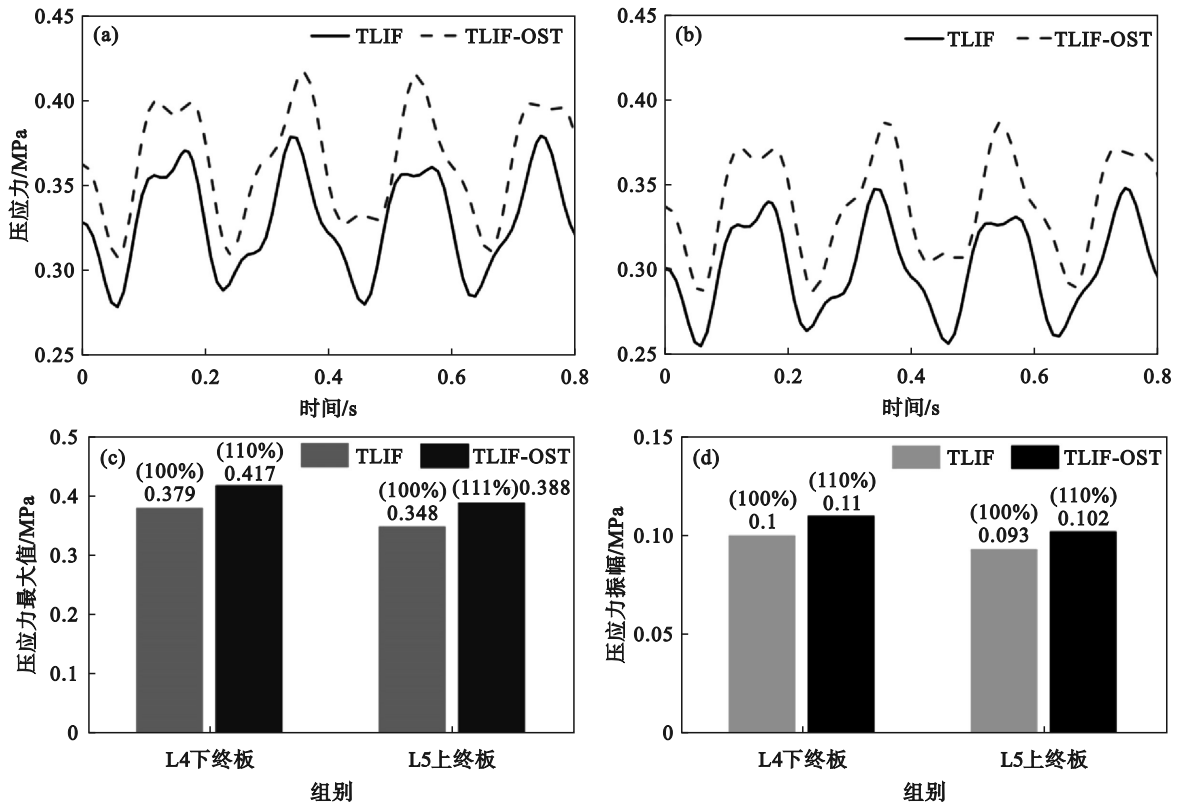


图 7 模型中融合器和终板界面处压应力的动态响应

Fig. 7 Dynamic response of the compressive stress at the interface between cages and end plates in the models

(a)—L4 下终板; (b)—L5 上终板; (c)—压应力最大值; (d)—压应力振幅.

3 讨 论

大量研究表明,骨质疏松症可能改变邻近节

段的生物力学特性,例如椎间盘的前后变形和应力分布^[17].本研究发现,TLIF-OST 模型中融合阶段的邻段椎间盘的前后变形动态响应显著增加.当暴露于振动环境下,患有骨质疏松的融合椎骨

会导致邻近节段疾病的风险增加.Ghasemi的临床研究也支持这一结论,他发现骨质疏松症患者椎间盘变形在磁共振成像上更为明显,且症状性邻近节段疾病的发生率显著增加^[18].对于融合节段,TLIF-OST模型L4下终板与L5上终板所承受的最大应力值,显著高于TLIF模型中的对应数值.从这一研究结果可以推断出,当人体处于振动环境中椎骨骨质疏松可能会导致融合器下沉进而影响融合效果.Jung等的临床和放射学研究也得出类似结论,他们发现骨量减少的患者在接受单节段融合并植入双侧固定器后,融合器下沉率显著高于骨密度正常的患者^[19].此外,本研究中TLIF-OST模型中融合器的最大应力和振幅均高于TLIF模型,这与Zhang等的研究结果一致,即骨质疏松模型中融合器应力更大,融合器下沉和失效的风险也更高^[20].这一结果表明,当人体处于振动环境中,融合节段椎骨的骨质疏松会增加融合器失效的风险,尤其是疲劳失效.在应力集中区域范围方面,TLIF-OST模型要比TLIF模型更大.实际上,类似研究也证实了连接杆和椎弓根螺钉颈部是应力集中的关键位置^[21].在振动情况下,骨质疏松的融合椎体产生了更大的应力和振幅.正因如此,TLIF-OST模型中的连接杆更易出现疲劳失效的情况.基于这些发现,推测骨质疏松的融合椎体可能增加连接杆失效的风险.

研究表明,前凸角的减小以及椎间盘高度的降低,与预后不良、腰椎不稳以及椎间盘退变等一系列并发症存在着密切的关联^[22].另外,针对椎骨细胞的相关研究显示,融合术效果的好坏与椎骨细胞的生长状况息息相关,过大的压应力会对椎骨细胞的生长产生抑制作用^[23].融合节段椎骨骨质疏松导致融合节段的椎间盘高度更难维持.融合节段椎骨骨质疏松可能导致融合节段的前凸角丧失.综合这些研究可以得出结论:骨质疏松会使得振动环境下的腰椎不稳,预后不良的风险增加.这一结论得到了Cho等研究的支持,他们发现骨质疏松症(在老年患者中较为常见)会显著降低融合的成功率^[24].在模拟过程中,骨质疏松显著增加融合节段椎骨的最大压应力及其振幅.根据椎骨细胞的应力-生长曲线可知,压应力越大,椎骨细胞的生长就越容易受到抑制^[25].由此可以推断,融合椎骨的骨质疏松可能致使椎骨细胞在振动环境下的生长受到更多的抑制,进而导致融合效果欠佳.

4 结 语

1) 当人体处于振动状态时,若融合节段椎骨出现骨质疏松的情况,邻近节段的稳定性可能会受到不利影响而变得更加脆弱,进而使得邻近节段发生病变的几率上升,同时也增加了植入器械失效以及腰椎不稳等一系列问题发生的风险.

2) 当人体处于振动状态时,融合节段椎骨的骨质疏松现象可能会导致融合效果欠佳.

参考文献:

- [1] 王庆东,郭立新,张驰,等.不同椎间融合方法对腰椎动态特性的影响[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(1):76-82.
(Wang Qing-dong, Guo Li-xin, Zhang Chi, et al. Effects of different interbody fusion methods on dynamic characteristics of lumbar spines[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2022, 43(1): 76-82.)
- [2] Cummings S R, Melton L J. Epidemiology and outcomes of osteoporotic fractures[J]. *Lancet*, 2002, 359:1761-1767.
- [3] Qiao N, Villemure I, Wang Z, et al. Optimization of S2-alari-lic screw (S2AI) fixation in adult spine deformity using a comprehensive genetic algorithm and finite element model personalized to patient geometry and bone mechanical properties[J]. *Spine Deformity*, 2024, 12: 595-602.
- [4] Cook S D, Salkeld S L, Stanley T, et al. Biomechanical study of pedicle screw fixation in severely osteoporotic bone[J]. *Spine Journal*, 2004, 4: 402-408..
- [5] Brier-Jones J E, Palmer D K, Inceoglu S, et al. Vertebral body fractures after transpoas interbody fusion procedures[J]. *Spine Journal*, 2011, 11:1068-1072.
- [6] Fan W, Zhang C, Zhang D X, et al. Biomechanical comparison of the influence of osteoporosis on the lumbar spine after lumbar interbody fusion surgery or non-fusion dynamic stabilization surgery under whole body vibration[J]. *Innovation and Research in BioMedical Engineering*, 2023, 44(5): 100797.
- [7] Wade K R, Schollum M L, Robertson P A, et al. Vibration really does disrupt the disc-a microanatomical investigation[J]. *Spine*, 2016, 41(15):1185-1198.
- [8] Bovenzi M, Hulshof C T J. An updated review of epidemiologic studies on the relationship between exposure to whole-body vibration and low back pain[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, 215(4): 595-611.
- [9] Wilke H J, Kaiser D, Volkheimer D, et al. A pedicle screw system and a lamina hook system provide similar primary and long-term stability: a biomechanical in vitro study with quasi-static and dynamic loading conditions[J]. *European Spine Journal*, 2016, 25(9): 2919-2928.
- [10] 李武杰,郭立新.不同姿势对脊椎胸腰节段爆裂骨折的影响[J].东北大学学报(自然科学版),2020,41(4):534-540.
(Li Wu-jie, Guo Li-xin. Effect of different postures on burst fracture of thoracolumbar segment [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(4): 534-540.)
- [11] Cheung K M C, Karppinen J, Chan D, et al. Prevalence and pattern of lumbar magnetic resonance imaging changes in a population study of one thousand forty-three individuals[J]. *Spine*, 2009, 34(9):934-940.

