

文章编号: 1004-7220(2024)05-0910-06

腰椎椎弓根螺钉矢状面方向与螺钉松动的相关性研究

占旭强[#], 余海鑫[#], 西信, 向卿志, 于研

(同济大学医学院附属同济医院 脊柱外科, 上海 200065)

摘要:目的 基于头尾周期性载荷及人工椎骨研究腰椎椎弓根螺钉矢状面方向与螺钉松动之间的相关性,为改善术中螺钉置入方向以减少术后螺钉松动发生率提供参考。方法 分别以头倾、平行及尾倾3种方向将腰椎椎弓根螺钉置入人工椎骨内,并将其安装于材料试验机中,而后予装置100 N预载荷和166 N循环载荷(循环周期为10 000次)。在加载过程中记录相应位移并绘制循环位移曲线。加载完毕后旋出螺钉,并测量螺钉孔洞体积,计算螺钉孔洞体积比值(螺钉孔洞体积与螺钉置入椎骨内体积的比值)。结果 循环位移曲线结果显示,头倾组中位移最大,其次是平行组,而尾倾组最小。螺钉孔洞体积比值结果显示,头倾组的比值最大,其次为平行组,最后是尾倾组。相关性分析结果显示,螺钉矢状面方向与末端位移(第10 000周期时对应的位移)($\rho=-0.897$, $P=0.02$)和螺钉孔洞体积比值($\rho=-0.902$, $P=0.01$)都存在负相关性。结论 腰椎椎弓根螺钉矢状面方向与螺钉松动之间存在负相关,即当螺钉矢状面方向在一定角度范围内由头倾朝平行及尾倾方向调整时,螺钉松动程度呈现减小趋势。

关键词: 腰椎椎弓根螺钉; 螺钉松动; 头尾周期性载荷; 矢状面方向; 人工椎骨

中图分类号: R 318.01

文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.05.017

Correlation Between Sagittal Orientation of Lumbar Pedicle Screw and Screw Loosening

ZHAN Xuqiang, YU Haixin, XI Xin, XIANG Qingzhi, YU Yan

(Department of Spine Surgery, Tongji Hospital, School of Medicine, Tongji University, Shanghai 200065, China)

Abstract: Objective To analyze the correlation between the sagittal orientation of lumbar pedicle screws and screw loosening based on the craniocaudal cyclic load and artificial vertebra, and to provide a reference for the improvement of screw orientation during surgery, consequently reducing the incidence of screw loosening postoperatively. **Methods** Pedicle screws were inserted into artificial vertebrae in the cranial, parallel, and caudal orientations. After the artificial vertebra was installed in the material testing machine, the model was subjected to a 100 N preload and 166 N cyclic load for 10 000 cycles. During loading, displacements were recorded and cycle-displacement curves were drawn. After the test was completed and the screws were removed, the screw hole volume was measured and the screw hole volume ratio (the ratio of screw hole volume to the volume of the screw inserted into the vertebra) was calculated. **Results** The cyclic displacement curve showed that the cranial group had the largest displacement, followed by the parallel and caudal groups. The screw-hole volume ratio results showed that the cranial group had the highest ratio, followed by the parallel and

收稿日期: 2024-03-13; 修回日期: 2024-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(81873774), 上海市创新医疗器械应用示范项目(23SHS03800), 上海市青年拔尖人才计划项目(SKW1811)

通信作者: 于研, 副教授, 博士生导师, E-mail: yu15@tongji.edu.cn

[#]为共同第一作者

caudal groups. Correlation analysis showed a negative relationship between screw sagittal orientation and terminal displacement (displacement corresponding to the 10 000th cycle) ($\rho = -0.897$, $P = 0.02$) and screw hole volume ratio ($\rho = -0.902$, $P = 0.01$). **Conclusions** There is a negative correlation between the sagittal orientation of the lumbar pedicle screw and screw loosening. Namely, when the screw sagittal orientation is adjusted from a cranial tilt to a parallel and even caudal tilt at a certain angle range, the incidence of screw loosening is reduced.

Key words: lumbar pedicle screw; screw loosening; craniocaudal cyclic load; artificial vertebra; sagittal orientation

腰背痛症状如今在人群中趋于年轻化,受困人群逐渐扩大^[1]。作为致残的主要原因,腰背痛症状严重影响着广大人群的工作和生活质量,也给社会带来了巨大的经济压力^[2]。其中,腰椎退行性疾病是引起腰背痛症状的主要疾病,还可导致下肢感觉、运动障碍甚至大小便失禁等严重症状,成为临床中患者不得不寻求治疗的主要原因^[3-4]。

目前,临床中针对腰椎退行性疾病的治疗主要包括保守治疗和手术治疗。当保守治疗无效时,手术治疗成为改善患者预后的最佳选择。腰椎椎间融合内固定术已成为手术治疗该疾病的金标准^[5]。其中,椎弓根螺钉被用于固定目标节段,提高术后节段稳定性。然而,术后仍然存在1%~60%患者发生椎弓根螺钉松动现象^[6]。螺钉松动可致使固定节段稳定性降低,进而导致一系列并发症,例如术后假关节、腰背痛复发、手术翻修等^[7]。

研究表明,术中调整椎弓根螺钉矢状面方向可改变钉骨把持力,进而影响螺钉松动程度^[8-11]。这些研究主要通过螺钉拔出实验测量螺钉最大轴向拔出力、螺钉最大旋出力矩等参数分析钉骨把持力,但这些参数并非导致术后螺钉松动主要力学机制的组成部分^[12-14]。因此,借助上述参数分析螺钉矢状面方向与螺钉松动之间的相关性具有间接性和不准确性。螺钉拔出实验下螺钉的失效模式在临床中很少见,而头尾周期性载荷下螺钉的失效模式更符合临床术后螺钉松动情况^[15]。此外,既往研究通过匹配人或动物椎骨密度来保持实验中不同个体间生物力学属性的一致性,而忽略了其他同样能影响椎骨生物力学属性的参数,例如骨小梁数量、骨体积分数、结构模型指数^[16]。目前,基于人体椎骨相关参数设计出的人工椎骨则能够在不同实验个体间保持良好的生物力学属性一致性^[15]。因此,本实验利用头尾周期性载荷及人工椎骨,直接

研究椎弓根螺钉矢状面方向与螺钉松动之间的相关性,为术中改善螺钉矢状面方向进而减少术后螺钉松动发生率提供相应依据。

1 材料与方法

1.1 构建生物力学实验模型

1.1.1 制作人工椎骨 采用目前已被证实可用来替代人体椎骨的人工椎骨(Sawbones公司,美国)。所使用的9块人工椎骨组成成分包括用于模拟骨质疏松型松质骨的固体硬质聚氨酯泡沫(密度80 mg/cm³,弹性模量16 MPa),以及模拟皮质骨的短纤维填充环氧树脂(密度160 mg/cm³,弹性模量17 GPa)。同时,根据实际人体椎骨尺寸,将人工椎骨设计为57 mm×57 mm×40 mm(长×宽×高)长方体,并设计两个深1 mm、直径6 mm圆孔以便置入螺钉^[15,17-18][见图1(a)]。

1.1.2 置入万向椎弓根螺钉 在人工椎骨前方放置1块方向控制导板,而后使用直径为4 mm的钻头沿导板上中空圆柱体(内径4 mm)的方向斜向15°在人工椎骨内钻出1个深度为20 mm孔洞。随后将万向椎弓根螺钉(外径6 mm,内径4 mm,长度40 mm,中国山东威高骨科材料股份有限公司)沿着上述孔洞拧入人工椎骨,直至螺纹末端刚好与皮质骨外缘齐平。万向椎弓根螺钉的矢状面方向包括头倾、平行和尾倾3种方向。根据临床中腰椎椎弓根螺钉置入最大角度可达±10°^[19-20],其中螺钉杆部与人工椎骨上表面之间-10°夹角被定义为头倾,0°夹角被定义为平行,+10°夹角被定义为尾倾[见图1(b)]。置入螺钉完毕后,使用分辨率为1 mm的CT(GE Healthcare公司,美国)对其进行扫描以获得相关影像文件,随后采用Mimics 21.0(Materialise公司,比利时)测量螺钉置入角度,以验证置入后方向是否符合预期。

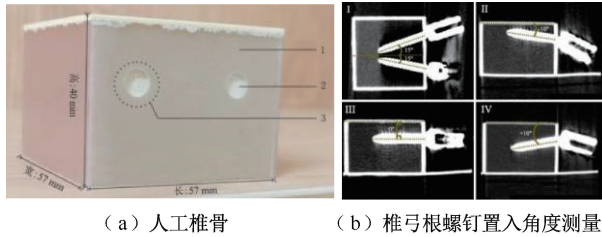


图1 人工椎骨及腰椎椎弓根螺钉置入角度测量

Fig. 1 Artificial vertebra and orientation measurement for lumbar pedicle screw (a) Artificial vertebra, (b) Measurement of lumbar pedicle screw orientation

注:图1(a)中,1-短纤维填充环氧树脂,2-固体硬质聚氨酯泡沫,3-圆孔;图1(b)中,I-横断面上螺钉斜 15° 置入人工椎骨内,II-头倾方向,III-平行方向,IV-尾倾方向。

1.1.3 组装实验模型 将1对单向椎弓根螺钉(外径6 mm,内径4 mm,长度40 mm,山东威高骨科材料股份有限公司)以平行方向置入1块与人工椎骨尺寸一致的超高分子量聚乙烯块(密度 980 mg/cm^3 ,弹性模量100 GPa)中,并通过铰链连接将超高分子量聚乙烯块连接至材料试验机(昆山海达精密仪器有限公司)压头上。同时,将人工椎骨固定于底座上,通过两根长度为80 mm钛棒与上方超高分子量聚乙烯块相连接。

在初步锁定螺钉和钛棒时,将超高分子量聚乙烯块与人工椎骨之间的距离调整为76 mm,而后使用扭矩扳手拧紧螺帽(扭矩为 $12 \text{ N}\cdot\text{m}$)^[21],并于正式加载前施加5 N载荷,并校正所有数值以确保不同组间的实验装置稳定性一致(见图2)。

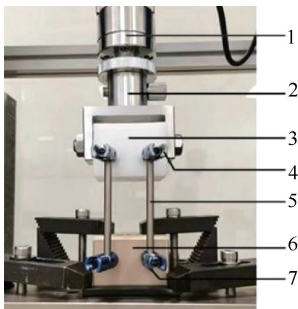


图2 实验装置

Fig. 2 Experiment setup

注:1-材料试验机,2-压头,3-超高分子量聚乙烯块,4-单轴椎弓根螺钉,5-钛棒,6-人工椎骨,7-方向椎弓根螺钉。

1.2 生物力学实验

由于术后螺钉主要受到矢状面载荷及螺钉松

动形式与矢状面载荷密切相关^[14-15],故主要从矢状面予实验模型载荷。施加在实验装置上的力由100 N预载荷和166 N循环载荷组成,循环载荷的频率为1.83 Hz,循环周期为10 000次^[15]。在加载过程中,以特定的间隔记录位移:第1~100个周期,每周期记录1次位移;第100~1 000个周期记录,每100个周期记录1次位移;第1 000~10 000个周期,每1 000个周期记录1次位移^[8]。

1.3 测量螺钉孔洞体积

为了对加载后的螺钉松动有一个直观的观察,先将万向椎弓根螺钉从人工椎骨内小心旋出,而后利用分辨率为 $75 \mu\text{m}$ 的Bruker SkyScan 1176 Micro-CT(SkyScan公司,比利时)对椎骨进行扫描。将所获得的DICOM图像导入Mimics中,根据灰度值差异对其内部螺钉孔洞区域进行阈值分割、蒙版绘制及三维重建,而后利用该软件直接算出螺钉孔洞体积^[22](见图3)。为估算旋出螺钉过程对螺钉孔洞体积影响的程度,将相同的万向椎弓根螺钉拧入完整人工椎骨至相同深度,而后在不施加任何载荷情况下小心旋出螺钉,重复该过程3遍。同时,为直观比较旋出螺钉过程及加载过程对螺钉孔洞体积的影响,将所有组别中的螺钉孔洞体积与加载前螺钉位于椎骨内的体积进行比较。基于椎弓根螺钉结构参数及人工椎骨内螺钉的置入深度,在SolidWorks 2017软件(SolidWorks公司,美国)中绘制出人工椎骨内的螺钉模型并计算出其体积,并定义螺钉孔洞体积比值=螺钉孔洞体积/椎骨内螺钉体积。

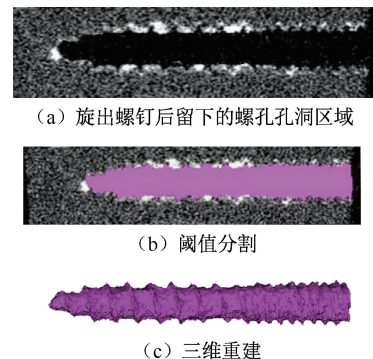


图3 螺钉孔洞体积测量

Fig. 3 Measurement of the screw hole volume (a) Screw hole region after removal of the pedicle screw, (b) Threshold segmentation, (c) Three-dimensional reconstruction

1.4 数据分析处理

采用循环位移曲线形式描述加载过程中位移与循环周期的关系。保证螺钉孔洞体积比值符合正态分布后,对其进行方差分析。采用 Spearman 相关分析来研究末端位移(第 10 000 周期时对应的位移)及螺钉孔洞体积比值与椎弓根螺钉矢状面方向间的相关性。所有符合正态分布的连续数据以(均值 \pm 标准差)表示。统计学意义定义为双侧 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 螺钉矢状面方向验证

人工椎骨内螺钉置入角度结果显示,头倾组中角度为 $-9.9^\circ \pm 0.3^\circ$,平行组中角度为 $0.1^\circ \pm 0.3^\circ$,尾倾组中角度为 $9.9^\circ \pm 0.4^\circ$ 。所有误差都保持在 0.5° 以内,表明螺钉置入角度误差对矢状面方向的影响可忽略不计。

2.2 循环位移曲线比较

循环位移曲线结果显示,3 组实验的加载初期都出现位移曲线陡增的现象,而后曲线呈现稳定且缓慢增加的过程。同时,头倾组的位移最大,其次是平行组,而尾倾组位移最小(见图 4)。

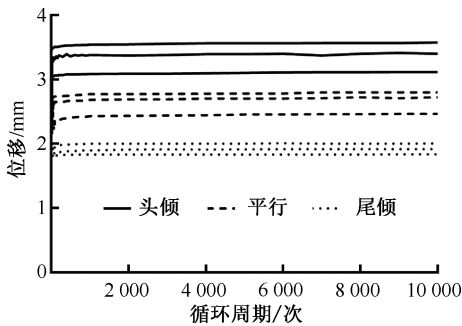


图 4 循环位移曲线比较

Fig. 4 Comparison of cycle-displacement curves

2.3 螺钉孔洞体积比值比较

螺钉孔洞体积比值方差分析结果显示,单纯旋出螺钉下的螺钉孔洞体积比值 (1.08 ± 0.02) 显著低于头倾组 (1.38 ± 0.03 , $P < 0.001$)、平行组 (1.29 ± 0.01 , $P < 0.001$) 及尾倾组 (1.20 ± 0.03 , $P = 0.001$)。同时,头倾组中的螺钉孔洞体积比值显著大于平行组 ($P = 0.006$) 及尾倾组 ($P = 0.001$),平行组螺钉孔洞体积比值显著大于尾倾组 ($P = 0.009$)。

2.4 相关性分析

Spearman 相关分析结果显示,螺钉矢状面置入方向与末端位移 ($\rho = -0.897$, $P = 0.02$) 和螺钉孔洞体积比值 ($\rho = -0.902$, $P = 0.01$) 都存在负相关性(见图 5)。

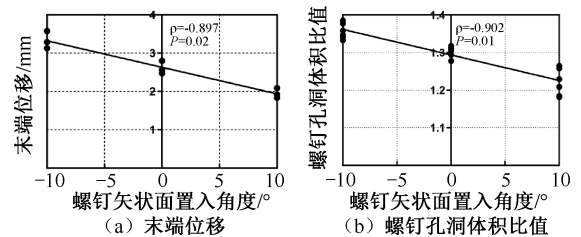


图 5 螺钉矢状面置入角度与末端位移及螺钉孔洞体积比值相关性曲线

Fig. 5 Correlation curves of screw sagittal orientation with terminal displacement and screw hole volume ratio

(a) Terminal displacement, (b) Screw hole volume ratio

注: -10° 代表头倾方向, 0° 代表平行方向, 10° 代表尾倾方向。

3 讨论

疲劳载荷是骨质疏松椎骨发生螺钉松动的危险因素^[23]。本文采用密度为 80 mg/cm^3 固体硬质聚氨酯泡沫材料模拟骨质疏松型松质骨,不仅与临床中常见的骨质疏松椎骨相符合,也使得该实验结果差异更易观察。循环位移曲线结果显示,位移先陡增而后稳定且缓慢增长,该现象符合固体硬质聚氨酯泡沫材料的力学属性,且这一变化形式与类似研究表现相似^[15]。尽管加载过程中位移总体变化较小,但与类似疲劳载荷实验中螺钉位移变化基本一致^[24-25]。上述对循环位移曲线结果的初步分析表明,实验模型具有相应的有效性。

循环位移曲线结果显示,头倾组的位移最大,其次是平行组,最后是尾倾组,表明头倾组中椎骨内部发生疲劳破坏的程度最大,其次为平行组和尾倾组。螺钉孔洞体积比值结果显示,单纯旋出螺钉的螺钉孔洞体积比值显著小于所有实验组的螺钉孔洞体积比值,表明加载完毕后单纯旋出螺钉过程引起螺钉松动体积的增多相对于实验加载过程带来的螺钉松动体积增多是可以忽略不计的。与循环位移曲线结果一致,螺钉孔洞体积比值结果也说明头倾组椎骨内部发生疲劳破坏的程度最大,其次为平行组和尾倾组。以上结果均表明,头倾方向下

螺钉松动程度最大,而尾倾方向下螺钉松动程度最小。相关分析结果中螺钉矢状面方向与末端位移($\rho = -0.897, P = 0.02$)及螺钉孔洞体积比值($\rho = -0.902, P = 0.01$)的强相关性提示,当螺钉矢状面方向从头倾方向依次朝平行方向及尾倾方向调整时(头尾倾置入角度都在 10° 及其以内),螺钉的松动程度呈现减小趋势。

本文发现,尾倾方向下螺钉松动程度最小,该结果与文献[8,26]的研究结果一致;但平行方向下的螺钉松动程度大于头倾方向下的螺钉松动程度,该结果则与文献[8,26]的研究结果相反。部分结果存在差异,可能与文献[8,26]研究中使用人体椎骨和不同方向下螺钉置入深度有关。本文认为,头倾方向下,椎体内的螺钉长度相对于平行方向下的稍长,且靠近上下终板位置的椎体松质骨密度高于椎体中部密度,从而致使头倾方向下钉骨把持力较平行方向下的钉骨把持力高^[27]。本研究所采用的人工椎骨可在不同实验组间保持良好的生物力学属性一致性,可避免难以控制的混杂因素,但将研究结果推广至临床实际时,应考虑人体椎骨内松质骨密度分布不均匀的现象。在人体椎骨中,头倾方向下螺钉所接触的松质骨密度较高,而尾倾方向下螺钉钉道大部分位于密度较低的椎体中部区域,水平方向下螺钉所接触的骨密度则介于二者之间,故充分考虑松质骨密度分布特点及螺钉置入方向特征,相应研究结果还需进一步研究。

本文结果显示,螺钉不同矢状面方向下螺钉松动程度存在的差异仅表示一个椎骨内部螺钉所受载荷下的松动情况,而非术后螺钉固定下单节段或多节段中整体的螺钉松动情况。因此,将该研究结果运用于临床真实情况还需进一步分析。针对临床中常见的单节段内固定手术,固定节段的上下位螺钉所受的力为1对相互作用力,即下位椎骨内螺钉受力的方向同本研究所施加力的方向一致并指向下方,但上位椎骨内螺钉受力的方向则指向上方^[28]。基于单节段内固定手术中螺钉的受力方式,上位椎骨内头倾方向下螺钉的受力方式类似于下位椎骨内尾倾方向下螺钉的受力情况,这进一步说明单节段内固定手术中上位椎骨内螺钉头倾方向与下位椎骨内螺钉尾倾方向的组合方式(头尾组合)可能是头尾周期性载荷下螺钉松动程度最小的

情况。此外,头尾组合下螺钉松动程度最小,不一定代表单节段内固定的整体结构稳定性最佳,还需考虑螺钉成角后所受应力增加致使螺钉更易疲劳失效的风险,以及邻近节段受力增加和过度代偿情况^[28]。因此,上述关于单节段内固定手术的头尾组合方式还需进一步研究。同时,对于临床中其他更为复杂的多节段内固定手术,其内部力学分析复杂多变,难以做出上述推论。

本研究存在以下局限性:① 实验标本采用人工椎骨而非人体腰椎椎骨,表明研究结果中的定量数据并不能代表临床的真实情况,但可为进一步研究提供参考;② 采用人工椎骨所得出的3种方向间螺钉松动程度差异还需考虑人体腰椎椎骨内松质骨密度分布差异及螺钉置入时与椎体松质骨接触特点;③ 实验模型为人体椎骨简化模型,对人体椎骨外形和内部椎弓根结构都做了简化,故其研究结果还需进一步在人体椎骨内验证;④ 本文结果仅代表螺钉在单一载荷下的情况,而在临床单节段及多节段内固定手术方面的运用,还需更多生物力学和临床前瞻性研究的支持。

4 结论

本文基于头尾周期性载荷和人工椎骨对腰椎椎弓根螺钉不同矢状面方向与螺钉松动程度的关系进行研究,结果显示,腰椎椎弓根螺钉矢状面方向与末端位移及螺钉孔洞体积比值呈显著负相关,说明将螺钉矢状面方向由头倾朝平行及尾倾方向调整时(头尾倾置入角度都在 10° 及其以内),螺钉的松动程度呈现减小趋势。同时,人体椎骨在外形、椎弓根及松质骨密度分布等方面较本实验模型复杂,故本文结果仅供参考,后续还需在人体椎骨内进一步分析,以得到更准确的研究结果。同时,将其用于指导临床复杂多变的内固定手术还需更多研究。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:占旭强、余海鑫负责实验执行、资料分析、论文撰写;西信、向卿志负责收集数据、资料分析;于研负责提出研究思路、资料分析、修改关键内容。

参考文献:

[1] 刘延青,郑拥军. 中国慢性腰痛流行病学调查[C]//2018

- 中国医师协会疼痛科医师分会年会论文集. 郑州: [s. n.], 2018; 18-23.
- [2] FOSTER NE, ANEMA JR, CHERKIN D, et al. Prevention and treatment of low back pain: Evidence, challenges, and promising directions [J]. *Lancet*, 2018, 391(10137): 2368-2383.
- [3] SONG Z, ZHU W, ZHENG J, et al. Comparison of short-term efficacy of MIS-TLIF and Endo-LIF in the treatment of single-segment degenerative lumbar diseases [J]. *Front Surg*, 2022(9): 922930.
- [4] 乔涵, 赵杰. 从生物力学角度看腰椎手术发展[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(1): 4-17.
QIAO H, ZHAO J. Development of lumbar surgery from biomechanical perspectives [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(1): 4-17.
- [5] 孙祥耀, 鲁世保, 张庆明, 等. 腰椎退行性疾病手术治疗的有限元建模研究进展及相关问题的述评 [J]. *中国骨与关节杂志*, 2023, 12(4): 241-247.
- [6] GALBUSERA F, VOLKHEIMER D, REITMAIER S, et al. Pedicle screw loosening: A clinically relevant complication? [J]. *Eur Spine J*, 2015, 24(5): 1005-1016.
- [7] LEE KY, LEE JH, KANG KC, et al. Strategy for obtaining solid fusion at L5-S1 in adult spinal deformity: Risk factor analysis for nonunion at L5-S1 [J]. *J Neurosurg Spine*, 2020, 33(3): 323-331.
- [8] YUAN Q, HAN XG, HAN X, et al. Krag versus Caudal trajectory technique for pedicle screw insertion in osteoporotic vertebrae: Biomechanical comparison and analysis [J]. *Spine*, 2014, 39(26): B27-35.
- [9] MOLINARI L, FALCINELLI C, GIZZI A, et al. Effect of pedicle screw angles on the fracture risk of the human vertebra: A patient-specific computational model [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2021(116): 104359.
- [10] AKGÜL T, KORKMAZ M, PEHLIVANOĞLU T, et al. Biomechanical comparison of pull-out strength of different cementation and pedicle screw placement techniques in a calf spine model [J]. *Indian J Orthop*, 2020, 54(Suppl 1): 134-140.
- [11] VARGHESE V, KRISHNAN V, KUMAR GS. Evaluating pedicle-screw instrumentation using decision-tree analysis based on pullout strength [J]. *Asian Spine J*, 2018, 12(4): 611-621.
- [12] CHO W, CHO SK, WU C. The biomechanics of pedicle screw-based instrumentation [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2010, 92(8): 1061-1065.
- [13] ROHLMANN A, GRAICHEN F, WEBER U, et al. 2000 Volvo Award winner in biomechanical studies: Monitoring *in vivo* implant loads with a telemeterized internal spinal fixation device [J]. *Spine*, 2000, 25(23): 2981-2986.
- [14] ROHLMANN A, BERGMANN G, GRAICHEN F. Loads on an internal spinal fixation device during walking [J]. *J Biomech*, 1997, 30(1): 41-47.
- [15] NOWAK B. Experimental study on the loosening of pedicle screws implanted to synthetic bone vertebra models and under non-pull-out mechanical loads [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2019(98): 200-204.
- [16] 李旭升, 高明暄, 梁晓燕, 等. 椎体骨微结构参数与椎弓根螺钉固定强度的相关性 [J]. *医用生物力学*, 2014, 29(3): 260-265.
LI XS, GAO MX, LIANG XX, et al. The relationship between microstructure of vertebral cancellous bone and fixation strength of pedicle screws [J]. *J Med Biomech*, 2014, 29(3): 260-265.
- [17] KOLTA S, KERKENI S, TRAVERT C, et al. Variations in vertebral body dimensions in women measured by 3D-XA: A longitudinal *in vivo* study [J]. *Bone*, 2012, 50(3): 777-783.
- [18] HOU S, HU R, SHI Y. Pedicle morphology of the lower thoracic and lumbar spine in a Chinese population [J]. *Spine*, 1993, 18(13): 1850-1855.
- [19] MIYASHITA T, ATAKA H, KATO K, et al. Pedicle screw shift without loosening following instrumented posterior fusion: limitations of pedicle screw fixation [J]. *Neurosurg Rev*, 2019, 42(3): 691-698.
- [20] 王海洲, 李宏伟, 王爽, 等. 基于数字技术的国人下腰椎椎弓根螺钉置钉角度特征 [J]. *中国组织工程*, 2015, 19(35): 5723-5727.
- [21] CHOMA TJ, FREVERT WF, CARSON WL, et al. Biomechanical analysis of pedicle screws in osteoporotic bone with bioactive cement augmentation using simulated *in vivo* multicomponent loading [J]. *Spine*, 2011, 36(6): 454-462.
- [22] NAGARAJA S, PALEPU V. Integrated fixation cage loosening under fatigue loading [J]. *Int J Spine Surg*, 2017, 11(3): 20.
- [23] SONG F, LIU Y, FU R, et al. Craniocaudal toggling increases the risk of screw loosening in osteoporotic vertebrae [J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2023(238): 107625.
- [24] WANG WT, GUO CH, DUAN K, et al. Dual pitch titanium-coated pedicle screws improve initial and early fixation in a polyetheretherketone rod semi-rigid fixation system in sheep [J]. *Chin Med J*, 2019, 132(21): 2594-2600.
- [25] SCHULZE M, GEHWEILER D, RIESENBECK O, et al. Biomechanical characteristics of pedicle screws in osteoporotic vertebrae—Comparing a new cadaver corpectomy model and pure pull-out testing [J]. *J Orthop Res*, 2017, 35(1): 167-174.
- [26] 史可强, 雷云霞, 王海奎, 等. 不同矢状角度置入椎弓根螺钉的拔钉生物力学研究 [J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2009, 24(4): 311-313.
- [27] WU SS, EDWARDS WT, YUAN HA. Stiffness between different directions of transpedicular screws and vertebra [J]. *Clin Biomech*, 1998, 13(1 Suppl 1): S1-S8.
- [28] ZHANG T, REN X, FENG X, et al. Failure mechanisms of pedicle screws and cortical screws fixation under large displacement: A biomechanical and microstructural study based on a clinical case scenario [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2020(104): 103646.