

后路长节段固定不同置钉密度下脊柱三维运动的稳定性

<https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4344.3788>

薛静波, 李戾鹏, 王程, 欧阳智华, 李学林, 晏怡果, 王文军

2095-4344.3788

投稿日期: 2020-06-09

送审日期: 2020-06-13

采用日期: 2020-08-04

在线日期: 2020-10-20

中图分类号:

R459.9; R318; R687

文章编号:

2095-4344(2021)12-01858-06

文献标识码: A

文章快速阅读:

文章亮点一

△实验采用六自由度关节机器人测试对后路不同置钉密度固定的猪脊柱在屈伸位、侧弯位及轴向旋转位进行柔韧性测试, 探讨置钉密度对固定脊柱三维运动稳定性的影响。

△对在连续的、非关键椎水平上双侧椎弓根螺钉移除时的结构稳定性进行生物力学评价, 并确定椎弓根螺钉密度降低到60%以下时的生物力学效应。

材料:

(1) 8具新鲜冰冻猪胸椎标本;
(2) 椎弓根螺钉、固定棒及六自由度关节机器人。

结论:

(1) 有限降低椎弓根螺钉置钉密度, 不会对脊柱后路长节段固定的稳定性造成不利影响;
(2) 椎弓根螺钉固定组中加入横向连接杆可以显著降低脊柱轴向旋转的活动度。

分组:

(1) 将已行全节段椎弓根螺钉固定的实验标本依次降低置钉密度分为全椎弓根螺钉组、82%椎弓根螺钉组、64%椎弓根螺钉组、36%椎弓根螺钉组、空白对照组;
(2) 将64%椎弓根螺钉固定组分为横联组和非横联组。

观察指标:

从光学追踪角度来观察固定脊柱标本在屈伸、侧弯及轴向旋转时的活动度。

文题释义:

置钉密度: 实验将脊柱标本上实际置入椎弓根螺钉数目占脊柱标本双侧可置入最大椎弓根螺钉数目的百分比定义为置钉密度。

三维运动稳定性: 实验通过光学追踪角度来观察固定脊柱标本在屈伸、侧弯及轴向旋转运动时的活动度以描述结构的稳定性。

摘要

背景: 脊柱后路矫形椎弓根螺钉内固定已成为青少年特发性脊柱侧凸最为常见的临床治疗方法, 但使用高密度的置钉方式会对患者造成更大的创伤且增加医疗成本。

目的: 利用六自由度关节机器人对后路不同置钉密度固定的猪脊柱进行生物力学测试, 探讨不同置钉密度对后路长节段固定脊柱三维运动稳定性的影响。

方法: 在8具猪脊柱标本中, 首先制备全椎弓根螺钉固定模型(100%固定), 之后依次减少椎弓根螺钉, 制备不同密度的椎弓根螺钉固定模型(82%, 64%, 36%), 最后无椎弓根螺钉固定的脊柱作为空白对照组。采用六自由度关节机器人测试各组猪脊柱标本在屈伸位、侧弯位及轴向旋转位的稳定性。

结果与结论: ①在屈伸位、侧弯位的测试中, 全椎弓根螺钉固定组(100%)与部分椎弓根螺钉固定组(82%, 64%, 36%)脊柱标本的活动度相比差异无显著性意义($P > 0.05$); ②在轴向旋转位测试中, 36%椎弓根螺钉固定组相比于全椎弓根螺钉固定组以及82%、64%椎弓根螺钉固定组, 轴向旋转的稳定性显著降低($P < 0.001$); ③在64%椎弓根螺钉固定组加入横向连接杆固定时, 可以显著降低脊柱标本轴向旋转的活动度($P < 0.05$); ④提示有限降低椎弓根螺钉的置钉密度, 不会对脊柱后路长节段固定的稳定性造成不利影响。

关键词: 脊柱; 后路; 矫形; 置钉密度; 长节段固定; 内固定; 生物力学

Stability of three-dimensional motion of spine with long-segment posterior fixation at different screw densities

Xue Jingbo, Li Zepeng, Wang Cheng, Ouyang Zhihua, Li Xuelin, Yan Yiguo, Wang Wenjun

Department of Spine Surgery, The First Affiliated Hospital of University of South China, Hengyang 421001, Hunan Province, China

Xue Jingbo, MD, Associate chief physician, Department of Spine Surgery, The First Affiliated Hospital of University of South China, Hengyang 421001, Hunan Province, China

Corresponding author: Wang Wenjun, MD, Chief physician, Department of Spine Surgery, The First Affiliated Hospital of University of South China, Hengyang 421001, Hunan Province, China

南华大学附属第一医院脊柱外科, 湖南省衡阳市 421001

第一作者: 薛静波, 男, 1985年生, 2016年广西医科大学毕业, 博士, 副主任医师, 主要从事脊柱外科方面的研究。

通讯作者: 王文军, 博士, 主任医师, 南华大学附属第一医院脊柱外科, 湖南省衡阳市 421001

<https://orcid.org/0000-0002-9327-825X> (薛静波)

基金资助: 湖南省临床医疗技术创新引导项目(2017SK50202), 项目负责人: 薛静波; 湖南省卫生计生委B类课题(20180154), 项目负责人: 薛静波;

湖南省卫生计生委科研计划课题重点项目(A2017016), 项目负责人: 晏怡果; 湖南省科技厅计划项目(2017SK4004), 项目负责人: 王文军

引用本文: 薛静波, 李戾鹏, 王程, 欧阳智华, 李学林, 晏怡果, 王文军. 后路长节段固定不同置钉密度下脊柱三维运动的稳定性 [J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(12):1858-1863.



Abstract

BACKGROUND: Spinal posterior orthopedic pedicle screw internal fixation has become the most common clinical treatment for adolescent idiopathic scoliosis, but the use of high density nail placement can cause greater trauma and increase medical costs.

OBJECTIVE: Using the six-degree-of-freedom joint robot, the biomechanical test of the pig spine with different posterior nail density was carried out to investigate the effect of different posterior nail density on the three-dimensional motion stability of the spine.

METHODS: In eight pig spine specimens, the model of total pedicle screw fixation (100% fixation) was first prepared. Afterwards, the pedicle screws were reduced in turn. Pedicle screws of different densities were placed in turn (82%, 64%, and 36%). Finally, the spine without pedicle screw fixation was used as the blank control group. A six-degree-of-freedom joint robot was used to test the flexibility of each group of pig spine specimens in flexion position, lateral bending position and axial rotation position.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) In flexion position and lateral bending position, there was no significant difference in range of motion of the spine specimens between the whole screw internal fixation group (100%) and the partial pedicle screw density group (82%, 64%, and 36%) ($P > 0.05$). (2) In the axial rotation test, the stability of axial rotation was significantly reduced in the 36% pedicle screw group compared to the total screw fixation group and the 82% and 64% pedicle screw fixation groups ($P < 0.001$). (3) When the 64% pedicle screw fixation group was added to the transverse connecting rod fixation, the range of motion of axial rotation of the spine specimen was significantly reduced ($P < 0.05$). (4) It is indicated that limited reduction of nail density of pedicle screws does not adversely affect the stability of posterior segment fixation.

Key words: spine; posterior approach; orthopedic; screw density; long segment fixation; internal fixation; biomechanics

Funding: the Guiding Project of Clinical Medical Technology Innovation in Hunan Province, No. 2017SK50202 (to XJB); the Class B Project of Health and Family Planning Commission of Hunan Province, No. 20180154 (to XJB); the Key Scientific Research Project of Health and Family Planning Commission of Hunan Province, No. A2017016 (to YYG); the Project Planned by Science and Technology Department of Hunan Province, No. 2017SK4004 (to WWJ)

How to cite this article: XUE JB, LI ZP, WANG C, OUYANG ZH, LI XL, YAN YG, WANG WJ. Stability of three-dimensional motion of spine with long-segment posterior fixation at different screw densities. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2021;25(12):1858-1863.

0 引言 Introduction

青少年特发性脊柱侧凸是一种相对较常见的运动系统畸形疾病,绝大多数患者可以正常生活,但在一定情况下,青少年特发性脊柱侧凸的进展常伴有肺功能下降和后背痛,这通常需要外科干预。脊柱后路矫形椎弓根螺钉内固定术已成为青少年特发性脊柱侧凸最为常见的临床治疗方法^[1-2],这种手术方式成功率高,且并发症发生率较低^[3-5],可取得良好的矫正和融合效果。目前临床上通常采用全椎弓根螺钉内固定或者高密度的椎弓根螺钉内固定后路矫形融合术,可以达到良好的侧凸矫形和脊柱融合的目的,但也会给患者家庭带来高昂的治疗费用。在中国,外科手术治疗青少年特发性脊柱侧凸的费用为每例 75 000-95 000 元,植入物费用为 10 000-15 000 元^[6-7]。在美国,青少年特发性脊柱侧凸的治疗费用为每例 1100 000-1150 000 美元不等^[8],置入的脊柱内固定材料费用占比为 21%-29%^[9-10]。除了增加成本外,使用高密度的椎弓根螺钉会对患者造成更大的创伤,同时增加了手术时间、辐射暴露和并发症风险,从而延长患者的术后恢复时间甚至造成不可逆性损伤^[11]。目前关于后路脊柱矫形内固定融合术中置钉密度对手术效果影响的生物力学研究较少,此次实验通过六自由度关节机器人检测不同置钉密度的椎弓根螺钉固定系统置入非形变猪脊柱标本后的三维运动稳定性,观察脊柱稳定性是否会随着椎弓根螺钉密度的降低而发生变化,利用非形变猪脊柱的生物力学实验,进一步探讨降低椎弓根螺钉密度对脊柱后路长节段固定的影响,旨在为后路椎弓根螺钉矫形内固定治疗青少年特发性脊柱侧凸提供一定的指导意义。

1 材料和方法 Materials and methods

1.1 设计 生物力学实验。

1.2 时间及地点 于 2019-05-01/30 在南华大学附属第一医

院生物力学实验室完成。

1.3 材料 此次研究使用的 8 具新鲜冰冻脊柱标本来自于中国白猪(购于湖南省衡阳市屠宰场),猪龄 18-26 周,体质量 110-120 kg。

1.4 方法

1.4.1 标本制备 将实验动物麻醉处死后立即取出脊柱标本放置在 -20 °C 环境下进行保存,直至测试开始时为止。在测试前,将标本放置在 4 °C 的冷藏室中保存 12 h,以达到充分解冻的目的。测试时,在室温下对实验标本进行解剖,猪脊柱标本被缩短至只包括 T₃-T₁₅ 水平,并对椎旁肌肉组织进行适当处理,完全暴露出 T₄-T₁₄ 水平椎体,同时保留至少 5 cm 的两侧肋骨、横突、所有关节和韧带^[12]。8 具标本均在 T₄-T₁₄ 各水平双侧用椎弓根螺钉(山东威高骨科材料股份有限公司)固定,双侧钛棒(山东威高骨科材料股份有限公司)预弯后放置于双侧椎弓根螺钉上使用固定螺母进行锁定,所有操作由单一脊柱外科医生通过标准技术完成。标本制备完成后,将各标本送回 4 °C 冷冻箱 12 h 后进行测试。

1.4.2 力学测试 测试在室温下进行,用生理盐水溶液保持标本组织的水分。将 6 枚螺钉置入标本头尾两端椎体中以进行固定(T₃ 椎体和 T₁₅ 椎体各 3 枚螺钉),其中 2 枚螺钉放置在标准的椎弓根内,另外 1 枚螺钉置入椎体前部,然后将标本连接到机器人测试系统(Staubli RX90; Staubli, Duncan, South Carolina),再将螺钉连接到定制夹具的近端与远端,标本尾端 T₁₅ 椎体连接到实验台,头端 T₃ 椎体通过机载六轴力/力矩传感器(JR3 Inc, Woodland, California)连接到机器人机械臂的末端执行器上(图 1),六轴称重传感器的检测范围为 0-90 N/0-11 N·m,分辨率为 0.27 N/0.023 N·m。定制软件(MATLAB, Mathworks Inc, Natick, Massachusetts)使用自适应位移来控制机器人,使用 4.0 N·m 的纯位移目标用于测试屈伸、侧弯和轴向旋转,这一位移目标是根据先前已验证的猪胸椎参数

选择的^[13-14]。使用具有5个摄像机的光学追踪系统来实现对脊柱运动节段的三维测量,利用该追踪系统对标记在T₄、T₉和T₁₄椎体上的反射标记物进行检测,并通过VICON视频运动捕捉系统(VICON 460; VICON, Oxford, United Kingdom)测量的根-均方误差来计算运动轨迹中每一步骤的运动角度和位移。

将未测试过的8具已进行全节段椎弓根螺钉固定的实验标本进行第1次测试,简称全椎弓根螺钉固定组;然后每具标本取下T₇和T₁₁水平的椎弓根螺钉进行第2次测试,简称82%椎弓根螺钉固定组;再取下T₆和T₁₂水平的椎弓根螺钉进行第3次测试,简称64%椎弓根螺钉固定组;第4次测试前取下T₈-T₁₀水平双侧椎弓根螺钉,简称36%椎弓根螺钉固定组;最后的测试是在无椎弓根螺钉固定的脊柱上进行,简称空白对照组。另外,实验还在64%椎弓根螺钉固定组T₇和T₁₁水平放置横向连接器进行测试以探究横联对脊柱三维运动的影响,简称64%椎弓根螺钉固定加横联组。实验首先测试最高密度结构,最后测试非器械脊柱,该方案的目的是尽量减少对标本的操作,减少实验误差。实验对每种加载条件进行3个连续循环测试,前2个循环为预处理循环,最后1个循环用于分析。

1.5 主要观察指标 从光学追踪角度分析脊柱三维节段运动,主要观察指标是固定脊柱标本在各个工况的活动度。

1.6 统计学分析 使用Excel(微软公司,华盛顿)进行计算,采用SPSS 21.0(IBM公司,USA)统计学软件进行统计学分析,在确认正常后,对未使用横联的5组不同密度椎弓根螺钉内固定组,数据采用具有Bonferroni校正的t检验进行组间比较,检验水准为 $\alpha < 0.05$, $P < 0.05$ 为差异有显著性意义;对64%椎弓根螺钉非横联组与横联组活动度的比较,数据采用配对t检验,统计学差异设置为 $P < 0.05$ 。

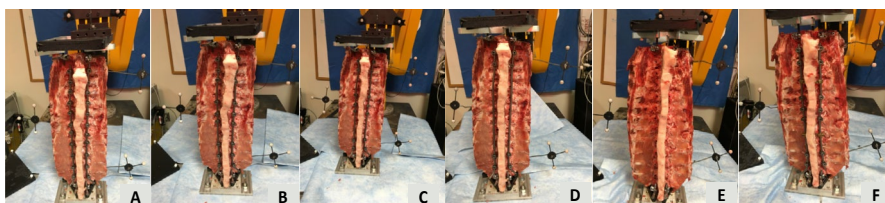
2 结果 Results

2.1 标本情况 所有样本的检测均为非破坏性的。测试完成时,未出现内植物

的断裂、脊柱骨折等相关不良事件,并且在研究结束取出内植物时未发现螺钉松动现象。

2.2 不同密度椎弓根螺钉固定组在屈伸、侧弯和轴向旋转时的活动度比较 实验对顶端内固定椎体(T₄)和下端内固定椎体(T₁₄)之间的节段运动学数据进行分析,脊柱活动度定义为从屈曲到伸展、左右侧屈或左右旋转的总运动弧线。在屈伸位、侧弯位的测试中,全椎弓根螺钉内固定组与部分椎弓根螺钉密度组(82%, 64%, 36%)的脊柱活

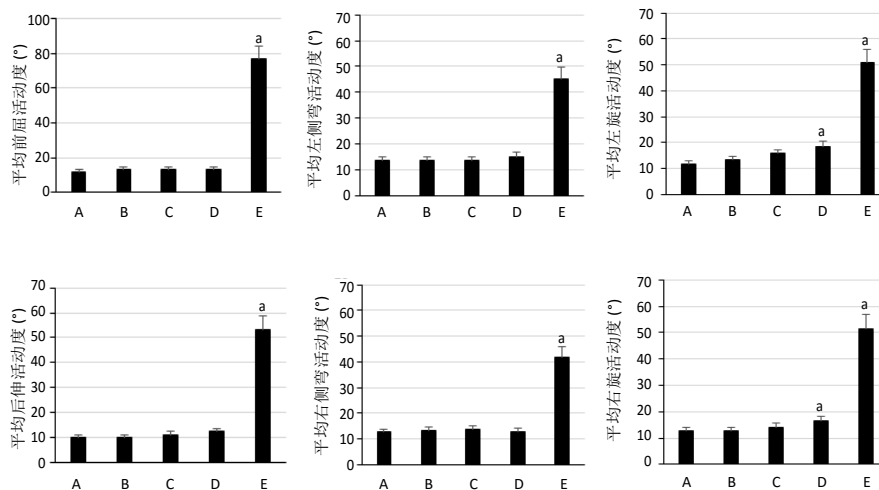
度相比差异无显著性意义($P > 0.05$)。与其他密度组椎弓根螺钉相比,在任何状态测试下,非器械脊柱的活动度均显著增加($P < 0.001$)。在轴向旋转位测试中,36%椎弓根螺钉组及空白对照组与全椎弓根螺钉固定组以及82%、64%椎弓根螺钉固定组相比,轴向旋转的稳定性显著降低($P < 0.001$),见图2。另外,在64%椎弓根螺钉固定组加入横向连接杆固定时,可以显著降低脊柱标本轴向旋转的活动度($P < 0.05$),见表1。



图注:图A为全椎弓根螺钉固定组,B为82%椎弓根螺钉固定组,C为64%椎弓根螺钉固定组,D为36%椎弓根螺钉固定组,E为空白对照组,F为64%椎弓根螺钉横联固定组

图1 | 对不同密度椎弓根螺钉固定组进行力学测试

Figure 1 | Mechanical tests of different density pedicle screw fixation group



图注:A为全椎弓根螺钉固定组,B为82%椎弓根螺钉固定组,C为64%椎弓根螺钉固定组,D为36%椎弓根螺钉固定组,E为空白对照组。与A,B,C组相比,^a $P < 0.05$

图2 | 不同密度椎弓根螺钉固定组在屈伸、侧弯和轴向旋转时的平均活动度比较

Figure 2 | Comparison of average range of motion of pedicle screw fixation group at flexion and extension, lateral bending and axial rotation at different densities

表1 | 64%椎弓根螺钉固定非横联组与横联组的活动度比较 ($\bar{x} \pm s$, $n=8$, °)

Table 1 | Comparison of range of motion of 64% pedicle screw fixation in non-transverse and transverse groups

组别	屈伸		侧屈		轴向旋转	
	前屈	后伸	左侧屈	右侧屈	左旋	右旋
非横联组	13.38±3.38	11.13±2.75	13.75±2.96	13.63±2.00	15.75±3.01	14.13±3.27
横联组	13.00±3.16	11.50±2.88	14.25±4.10	13.50±1.77	14.38±2.26 ^a	12.50±2.07 ^a

表注:与非横联组相比,^a $P < 0.05$

3 讨论 Discussion

脊柱后路矫形椎弓根螺钉内固定治疗效果已被广泛接受。1995年SUK等^[15]第一次使用全椎弓根螺钉技术治疗青少年特发性脊柱侧凸。相比以往的内固定系统,全脊柱椎弓根螺钉内固定可为矫形后的脊柱提供更高的稳定性,手术可获得更好的侧弯矫正^[16]。但在目标矫正节段的每一脊椎水平进行椎弓根螺钉结构固定势必会最大程度增加手术切口长度、手术时间、术中术后出血、住院天数及植入物成本。为了降低青少年特发性脊柱侧凸患者治疗中的医疗费用及手术创伤,临床上一直在寻找脊柱矫形椎弓根螺钉内固定术理想的置钉方式,为了达到这一目的,最直接有效的方法是减少内固定术中椎弓根螺钉的使用数量。目前,在特发性脊柱侧凸的手术治疗中,根据临床医生使用椎弓根螺钉方式的不同通常分为3种方式:即连续性置钉固定、间断性置钉固定和关键椎置钉固定,3种置钉方式的置钉密度依次降低^[17-18]。许多临床随访研究表明在青少年特发性脊柱侧凸的治疗中,对侧凸脊柱中的端椎、顶椎、中立椎及稳定椎等关键椎体置钉可取得良好的矫形效果,同时,相比于连续性置钉固定、间断性置钉固定等方式,采用关键椎螺钉固定能显著减少手术时间、术中术后出血、手术切口长度、住院天数及植入物成本^[19-20],减少脊柱矫形椎弓根螺钉内固定手术治疗中使用的椎弓根螺钉数量,可以降低特发性脊柱侧弯的7%手术治疗费用^[21]。而QUAN等^[22]和BHARUCHA等^[23]的临床研究表明,降低椎弓根螺钉密度并不会影响脊柱在矢状位或冠状位上的活动范围。另有10年的长期随访研究表明,椎弓根螺钉密度在50%或以上时具有稳定的长期矫形能力和较高的满意度^[4]。目前关于不同置钉密度对脊柱后路长节段固定的生物力学基础研究甚少,此次研究的目的是进一步了解减少椎弓根螺钉密度配置的生物力学特征,利用机器人测试非变形猪脊柱标本,验证脊柱稳定性如何随着椎弓根螺钉密度的降低而变化。

有学者提出侧弯脊柱凹侧置椎弓根螺钉对于脊柱曲度矫正和维持稳定性的作用比侧弯脊柱凸侧置钉更关键,减少侧弯脊柱凸侧椎体的置钉数量是减少椎弓根螺钉的总置钉数量的一个选择^[24]。然而这一论断有一定的争议,因为顶椎置钉密度是影响术后顶椎区残留旋转的危险因素^[25-27],因此大多数脊柱外科医生通常会在顶椎进行双侧器械固定以改善稳定性。此外,在端椎置钉能够最大限度地提高钛棒的扭转刚度。另有研究表明,置钉密度大于50%-60%的椎弓根螺钉结构的稳定性与全内固定结构相比没有显著差异^[22]。此次研究的重点是对在连续的、非关键椎水平上双侧椎弓根螺钉移除时的结构稳定性进行生物力学评价,并确定椎弓根螺钉密度降低到60%以下时的生物力学效应。于是此次实验选择了11节段的长节段非变形猪脊柱作为研究标本,基于椎弓根螺钉强大的刚度,在保证螺钉承受最大拔出力的前提下,将矫形侧凸的力分给各个关键椎体,从而最大限度地减少椎弓根螺钉的使用数量,结果显示在一定范围内,不

同置钉密度对于固定脊柱前屈后伸位及侧曲位的活动无明显影响,但置钉密度过低时,内固定结构抗脊柱旋转稳定性会降低。根据实验结果可以得出结论:在一定范围内有限降低椎弓根螺钉的置钉密度,不会对脊柱后路长节段固定的稳定性造成不利的影 响。SALMINGO等^[28]通过建立三维有限元模型探讨螺钉矫形力与畸形矫正程度的关系,结果显示椎弓根螺钉密度与螺钉矫形力的总和及矫形力的最大值均无相关性,但畸形矫正程度与凹侧螺钉密度明显相关,螺钉密度越大矫正程度越大。这表明脊柱侧凸矫正机制不仅取决于螺钉的数量和作用于植入物的矫正力,而且与螺钉置入位点有关。WANG等^[29]通过计算机建模检测不同椎弓根螺钉密度水平的脊柱侧凸患者之间的骨螺钉负荷和畸形矫正的差异,结果表明不同置钉密度水平测试都有相似的畸形矫正和平均骨螺钉力。

通常来说,脊柱的平衡是脊柱正常承受载荷的前提,这种稳定体现在正常的生理曲线,当脊柱发生畸形,如脊柱侧弯时,脊柱失去平衡,脊柱节段活动超过正常范围,此时载荷在节段间无法顺利传递。采用椎弓根螺钉内固定即是通过作用在脊柱的弯矩进行矫形以恢复脊柱稳定性。此次研究中,各实验组均保留了最上端2节椎体和最下端2节椎体的双侧椎弓根螺钉并用钉棒连接固定,相较空白对照组,固定脊柱的稳定性获得了明显的提升。但顶椎作为脊柱侧凸中心的椎体,一般是在整个侧凸节段中最水平的椎体,也是侧凸椎体中旋转程度最大的椎体,顶椎去旋转的处理在特发性脊柱侧凸后路矫形手术中起到关键性作用^[30],仅固定上、下端椎无法获得更高的抗旋转稳定性,因此,为了维持全脊柱结构的抗旋转稳定性,除了固定上、下端椎,至少还需固定中立椎及稳定椎并连接成整体结构。椎弓根螺钉置入后在体内受轴向拔出力、横向屈曲力和旋转应力3种应力的共同作用,对一个椎体进行内固定,会使邻近节段椎体承受的应力增加^[31],而较高密度的置钉可使更多螺钉参与分散应力从而增加整个结构的稳定性,但较高的螺钉密度往往会对脊柱器械造成过大的限制,导致骨-螺钉界面处的受力较高^[32]。而低密度置钉结构尽管在屈伸、侧弯活动时的稳定性与高密度置钉结构相似,但由于增加了运动装置轴向旋转的自由度,导致器械的刚度降低,可能更易发生断棒、弯曲或螺钉松动等相关并发症。虽然许多现代器械高度提倡保留脊柱节段运动^[33],但轴向旋转稳定性的降低会影响脊柱术后固定稳定性以及融合率。

另外,有研究显示椎弓根螺钉内固定结构中加入横向连接杆可显著提高脊柱的轴向旋转稳定性^[34]。KUKLO等^[35]采用横向连接器对长段胸椎椎弓根螺钉进行体外生物力学研究,结果表明在长节段脊柱椎弓根螺钉固定结构中,添加一个横向连接杆即可显著降低轴向旋转应力,而使用2个连接杆稳定性更佳。此次研究通过在相同置钉密度内固定结构中加入2个水平横向连接杆得到了相似的结果。也有学者通过建立骨折模型模拟分析长节段、短节段与不同

横连固定的力学效应,结果表明长节段椎弓根螺钉固定较短节段固定稳定性更佳,而将横联交叉固定成“X”形可提高结构的固定刚度,并可减小66.7%的邻近节段应力,明显增加了椎弓根螺钉内固定系统的稳定性^[36]。通常认为横向连接杆具有抵抗固定术后脊柱旋转的作用,是因为横向连接杆将两侧钉棒系统连接成一个整体,形成一个有效的三维固定装置,从而使整个内固定系统共同承担各种负荷来抵抗扭曲和剪切应力^[37]。

青少年特发性脊柱侧凸的特征之一是轴状面的椎体旋转,因此,纠正旋转畸形是治疗青少年特发性脊柱侧凸的一个重点目标。由于此次研究的主要目的是探究不同置钉密度对侧弯脊柱固定强度的影响,因此未对各组全部进行横联杆的对照实验。实验通过64%密度组进行横联杆对比从侧面证实了椎弓根螺钉内固定结构中加入横向连接杆可提高脊柱的轴向旋转稳定性,由此推测在有限范围内降低椎弓根螺钉的置钉密度,在保持内固定结构屈伸、侧弯稳定性的基础上,使用横向连接杆可提高椎弓根螺钉内固定术后脊柱抗旋转稳定性,这对于青少年特发性脊柱侧凸的治疗具有理想的可行性。

此次研究有几处不足:①第一是该实验样本量较小($n=8$);②第二是在这项研究中使用的标本是未形变的猪脊柱模型,虽有研究证实猪脊柱和人类脊柱在高度、宽度和椎弓根直径等方面具有相似的生长速度和椎体解剖结构^[38],但猪为四足哺乳动物,脊柱所承受的重力垂直负荷基本忽略不计,因此几乎不受Hueter-Volkman定律的影响;③此外,在降低椎弓根螺钉密度的过程中,忽略了人类胸椎如 T_4 、 T_7 移行部的一些特殊部位,实验标本为未形变脊柱,其生物力学可能与人类脊柱侧弯的脊柱有很大不同^[39];④该研究对椎弓根螺钉密度在60%以下的分组较少,无40%~60%密度区间椎弓根螺钉内固定组,在以后的研究中课题组考虑增加更多实验组进行充分评估;对不同置钉密度椎弓根螺钉内固定组还需进行更多的相关力学研究,包括随着外力改变而引起的钉棒机械变化,以及在设计过程中可能出现的任何导致钉棒破坏的因素,这对未来将其用于临床前评估很有必要。

此次研究提供的力学数据表明,在非变形脊柱模型的力学测试中,一定范围内增加椎弓根螺钉密度并不能赋予脊柱更多的稳定性及生物力学优势,因此在特发性脊柱侧弯的手术治疗中有限地降低椎弓根螺钉密度是合理的。作为对现有临床研究的补充,此次研究结果增加了临床医生治疗特发性脊柱侧凸患者的理论依据。

作者贡献:薛静波负责标本收集、手术实施及文章撰写,薛静波、王程负责实验设计,欧阳智华、李学林负责手术实施,李晟鹏参与标本收集及文章撰写,晏怡果、王文军负责评估。

经费支持:该文章接受了“湖南省临床医疗技术创新引导项目(2017SK50202)、湖南省卫生计生委B类课题(20180154)、湖南省卫生计生委科研计划课题重点项目(A2017016)及湖南省科技厅计划项目(2017SK4004)”的基金资助。所有作者声明,经费支持没有影响文章观点和对研究数据客观结果的统计分析及其报道。

利益冲突:文章中干预手段应用了山东威高骨科材料股份有限公司的医疗器械,文章的全部作者声明,没有接受该器械的任何资助,在课题研究和文章撰写过程,不存在利益冲突。

机构伦理问题:实验方案经南华大学附属第一医院动物实验伦理委员会批准。实验过程遵循了国际兽医学编辑协会《关于动物伦理与福利的作者指南共识》和本地及国家法规。

写作指南:该研究遵守国际医学期刊编辑委员会《学术研究实验与报告和医学期刊编辑与发表的推荐规范》。

文章查重:文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次查重。

文章外审:文章经小同行外审专家双盲外审,同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

生物统计学声明:文章统计学方法已经过南华大学附属第一医院生物统计学专家审核。

文章版权:文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

开放获取声明:这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享4.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

4 参考文献 References

- LENKE LG, KUKLO TR, ONDRA S, et al. Rationale behind the current state-of-the-art treatment of scoliosis (in the pedicle screw era). *Spine*. 2008;33:1051-1054.
- 吕国华,王冰,马泽民,等.多节段椎弓根螺钉内固定系统矫正胸椎侧凸畸形的有效性和安全性评价[J].中国脊柱脊髓杂志,2004,14(4):23-25.
- 张伟,朱晓东,吴大江,等.置钉密度与Lenke I型青少年特发性脊柱侧凸矫正率的相关性[J].中国矫形外科杂志,2011,19(7):558-561.
- MIN K, SDZUY C, FARSHAD M. Posterior correction of thoracic adolescent idiopathic scoliosis with pedicle screw instrumentation: results of 48 patients with minimal 10-year follow-up. *Eur Spine J*. 2013; 22:345-354.
- DEDE O, WARD WT, BOSCH P, et al. Using the freehand pedicle screw placement technique in adolescent idiopathic scoliosis surgery: what is the incidence of neurological symptoms secondary to misplaced screws? *Spine*. 2014;39:286-290.
- 张国志,王宇飞,杨克敏,等.全椎弓根螺钉一期后路手术治疗重度脊柱侧凸畸形[J].昆明医学院学报,2011,32(3):76-80+92.
- 申明奎,罗明,李鹏,等.连续置钉、间断置钉和关键椎置钉治疗Lenke I型青少年特发性脊柱侧凸的疗效对比[J].中华小儿外科杂志,2018,39(1):57-63.
- DAFFNER SD, BEIMESCH CF, WANG JC. Geographic and demographic variability of cost and surgical treatment of idiopathic scoliosis. *Spine*. 2010;35:1165-1169.
- RUSHTON PR, ELMALKY M, TIKOO A, et al. The effect of metal density in thoracic adolescent idiopathic scoliosis. *Eur Spine J*. 2016;25(10):3324-3330.
- KAMERLINK JR, QUIRNO M, AUERBACH JD, et al. Hospital cost analysis of adolescent idiopathic scoliosis correction surgery in 125 consecutive cases. *J Bone Joint Surg Am*. 2010;92:1097-1104.
- 曾忠友,裴斐,张建乔,等.腰椎后路内固定融合术并发神经损伤的原因分析和处理[J].脊柱外科杂志,2016,14(2):83-86.
- ODA I, ABUMI K, LU D, et al. Biomechanical role of the posterior elements, costovertebral joints, and rib cage in the stability of the thoracic spine. *Spine*. 1996;21:1423-1429.

- [13] THAWRANI DP, GLOS DL, COOMBS MT, et al. Transverse process hooks at upper instrumented vertebra provide more gradual motion transition than pedicle screws. *Spine*. 2014;39:E826-832.
- [14] QUICK ME, GRANT CA, ADAM CJ, et al. A biomechanical investigation of dual growing rods used for fusionless scoliosis correction. *Clin Biomech*. 2015;30:33-39.
- [15] SUK SI, LEE CK, KIM WJ, et al. Segmental pedicle screw fixation in the treatment of thoracic idiopathic scoliosis. *Spine*. 1995;20:1399-1405.
- [16] 赵云飞, 杨长伟, 李明. 全椎弓根螺钉治疗青少年特发性脊柱侧凸置钉策略的研究进展 [J]. *骨科*, 2017,8(3):249-252.
- [17] KETENCI IE, YANIK HS, DEMIROZ S, et al. Three-Dimensional Correction in Patients With Lenke 1 Adolescent Idiopathic Scoliosis: Comparison of Consecutive Versus Interval Pedicle Screw Instrumentation. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2016;41:134-138.
- [18] HWANG CJ, LEE CK, CHANG BS, et al. Minimum 5-year follow-up results of skipped pedicle screw fixation for flexible idiopathic scoliosis. *J Neurosurg Spine*. 2011;15:146-150.
- [19] 李志鲲, 陈超, 徐炜, 等. 关键椎置钉与连续置钉治疗 Lenke I 型青少年特发性脊柱侧凸的疗效对比 [J]. *脊柱外科杂志*, 2015,13(5): 257-261.
- [20] SHEN M, JIANG H, LUO M, et al. Comparison of low density and high density pedicle screw instrumentation in Lenke 1 adolescent idiopathic scoliosis. *BMC Musculoskelet Disord*. 2017;18: 336.
- [21] LARSON AN, POLLY DW JR, ACKERMAN SJ, et al. What would be the annual cost savings if fewer screws were used in adolescent idiopathic scoliosis treatment in the US? *J Neurosurg Spine*. 2016;24:1
- [22] QUAN GM, GIBSON MJ. Correction of main thoracic adolescent idiopathic scoliosis using pedicle screw instrumentation: does higher implant density improve correction? *Spine*. 2010;35:562-567.
- [23] BHARUCHA NJ, LONNER BS, AUERBACH JD, et al. Low-density versus high-density thoracic pedicle screw constructs in adolescent idiopathic scoliosis: do more screws lead to a better outcome? *Spine J*. 2013;13: 375-381.
- [24] LE NAVEAUX F, AUBIN CE, LARSON AN, et al. Implant distribution in surgically instrumented Lenke 1 adolescent idiopathic scoliosis: does it affect curve correction? *Spine*. 2015;40:462-468.
- [25] 江华, 肖增明, 詹新立, 等. Lenke 1 型特发性脊柱侧凸患者术后顶椎区残留旋转的危险因素分析 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2016,24(15): 1428-1430.
- [26] 郑欣, 王渭君, 钱邦平, 等. 顶椎置钉与否对 Lenke1 型青少年特发性脊柱侧凸矫正效果的影响 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2012,22(8): 707-711.
- [27] BEHENSKY H, COLE AA, FREEMAN BJ, et al. Fixed lumbar apical vertebral rotation predicts spinal decompensation in Lenke type 3C adolescent idiopathic scoliosis after selective posterior thoracic correction and fusion. *Eur Spine J*. 2007;16:1570-1578.
- [28] SALMINGO RA, TADANO S, FUJISAKI K, et al. Relationship of forces acting on implant rods and degree of scoliosis correction. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2013;28:122-128.
- [29] WANG X, AUBIN CE, LARSON AN, et al. Biomechanical analysis of pedicle screw density in spinal instrumentation for scoliosis treatment: first results. *Stud Health Technol Inform*. 2012;176:303-306.
- [30] 马华松, 海涌, 白克文, 等. 青少年特发性脊柱侧凸节段性固定点的选择 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2004,12(21):41-43.
- [31] BENGARD MJ, GARDNER MJ. Screw depth sounding in proximal humerus fractures to avoid iatrogenic intra-articular penetration. *J Orthop Trauma*. 2011;25(10):630-633.
- [32] DELIKARIS A, WANG X, BOYER L, et al. Implant Density at the Apex Is More Important Than Overall Implant Density for 3D Correction in Thoracic Adolescent Idiopathic Scoliosis Using Rod Derotation and En Bloc Vertebral Derotation Technique. *Spine*. 2018;43:E639-E647.
- [33] SJOVOLD SG, ZHU Q, BOWDEN A, et al. Biomechanical evaluation of the Total Facet Arthroplasty System® (TFAS®): loading as compared to a rigid posterior instrumentation system. *Eur Spine J*. 2012;21: 1660-1673.
- [34] WANG Z, SAKAKIBARA T, YOSHIKAWA T, et al. Do the position and orientation of the crosslink influence the stiffness of spinal instrumentation? *Clin Spine Surg*. 2017;30:176-180.
- [35] KUKLO TR, DMITRIEV AE, CARDOSO MJ, et al. Biomechanical contribution of transverse connectors to segmental stability following long segment instrumentation with thoracic pedicle screws. *Spine*. 2008;33:E482-487.
- [36] ALIZADEH M, KADIR MR, FADHLI MM, et al. The use of X-shaped cross-link in posterior spinal constructs improves stability in thoracolumbar burst fracture: a finite element analysis. *J Orthop Res*. 2013;31: 1447-1454.
- [37] WEI FX, LIU SY, LIANG CX, et al. Transpedicular fixation in management of thoracolumbar burst fractures: monosegmental fixation versus short-segment instrumentation. *Spine*. 2010;35:E714-720.
- [38] STRATHE AB, SORENSEN H, DANFAER A. A new mathematical model for combining growth and energy intake in animals: the case of the growing pig. *J Theor Biol*. 2009;261:165-175.
- [39] WILKE HJ, MATHES B, MIDDERHOFF S, et al. Development of a scoliotic spine model for biomechanical in vitro studies. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2015;30:182-187.