

基于骨盆矢状位参数恢复强直性脊柱后凸矢状面平衡的生物力学分析

<https://doi.org/10.12307/2021.258>谢江¹, 代杰¹, 李辉², 朱旭¹

投稿日期: 2020-12-04

送审日期: 2020-12-12

采用日期: 2021-01-16

在线日期: 2021-03-19

中图分类号:

R459.9; R318; R445

文章编号:

2095-4344(2021)30-04762-05

文献标识码: A

文章快速阅读:

文章特点一

△强直性脊柱后凸患者脊柱形态差异大, 个性化手术方案的设计是决定手术成败和术后矫形效果的关键。

△基于是否重建脊柱矢状面平衡, 以此设计不同角度的截骨方案, 通过计算机模拟软件计算相应生物力学参数, 验证恢复矢状面平衡的意义。

研究方法

(1) 纳入1例强直性脊柱炎后凸畸形患者, 扫描脊柱CT并导入计算机模拟软件中;

(2) 基于是否重建矢状面平衡设计两种不同的矫形方案。

观察指标

(1) 不同工况下两种模型的内固定应力数值;

(2) 两种模型的位移数值。

结论

基于骨盆矢状位参数设计个性化矫形方案恢复强直性脊柱后凸矢状面平衡是合理、科学的, 可在保证矫形效果的同时降低应力分布。

文题释义:

骨盆矢状位参数: 骨盆是矢状面生理曲线的重要组成部分, 其作用在整个脊柱-骨盆系统中显得十分重要, 主要包含骨盆入射角、骨盆倾斜角、骶骨倾斜角等参数。

强直性脊柱后凸畸形: 人体矢状面平衡主要由脊柱、骨盆和髋关节组成, 强直性脊柱炎合并后凸畸形患者的脊柱形态、骨盆参数以及髋关节形态都发生改变, 表现为胸椎后凸角增大、腰椎前凸角减少及矢状位平衡前移。为维持站立位时平衡与视线水平, 人体通过骨盆后倾、髋关节过伸、膝关节屈曲来代偿。

摘要

背景: 强直性脊柱炎后凸主要表现为矢状位畸形, 截骨角度是术前需要解决的关键问题之一, 矫正角度不足以及矫正过度都可能造成脊柱矢状位的二次失衡。

目的: 应用计算机辅助软件建立强直性脊柱炎后凸三维有限元模型, 基于骨盆矢状位参数设计个性化手术截骨方案恢复矢状面平衡, 并分析其生物力学特性。

方法: 收集新疆医科大学第六附属医院1例强直性脊柱炎后凸住院患者C₁至骶尾骨的CT数据, 根据301分型确定后凸畸形为IIIA型。将CT数据导入计算机建模软件中, 建立强直性脊柱后凸畸形三维有限元模型, 测量骨盆入射角、骨盆倾斜角数值, 并通过骨盆入射角计算理论骨盆倾斜角角度。设计两种不同截骨方案的模型, 其中模型2使用肺门-髋轴测量方法(重建矢状面平衡)测量L₃预截骨角度为32.2°, 模型1则在未重建矢状面平衡下设置截骨角度为40°, 在构建完成的两个模型上模拟去松质骨截骨术, 并对截骨矫形后模型的钉棒系统、截骨面进行有限元计算。

结果与结论: ①有限元分析结果显示, 在脊柱前屈工况下, 6个固定节段中除S₁节段外, 其他5个固定节段模型1的螺钉应力均要高于模型2, 钛棒和接骨面应力亦是如此; ②在脊柱后伸工况中, 由于截骨角度过大导致患者重心后移, 使两者应力差异更加明显, 其中差距最大的为L₄节段螺钉, 模型1明显高于模型2, 差异为149.69 MPa; ③截骨面的应力图显示, 应力主要集中于截骨面的后方, 而前方的应力普遍在12 MPa以下; ④提示基于骨盆矢状位参数设计个性化截骨方案恢复强直性脊柱后凸矢状面平衡是合理、科学的, 可在保证矫形效果的同时降低应力分布。

关键词: 强直性脊柱后凸; 骨盆; 矢状位参数; 生物力学; 矢状面平衡

Biomechanical analysis of sagittal balance restoration of ankylosing kyphosis based on pelvic sagittal parameters

Xie Jiang¹, Dai Jie¹, Li Hui², Zhu Xu¹¹First Department of Spinal Surgery, the Sixth Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830001, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China;²Department of Cardiovascular Surgery, Linfen People's Hospital, Linfen 041000, Shanxi Province, China

Xie Jiang, Master, Associate chief physician, First Department of Spinal Surgery, the Sixth Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830001, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

Corresponding author: Li Hui, Master, Attending physician, Department of Cardiovascular Surgery, Linfen People's Hospital, Linfen 041000, Shanxi Province, China¹新疆医科大学第六附属医院脊柱外一科, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830001; ²临汾市人民医院心脏大血管外科, 山西省临汾市 041000

第一作者: 谢江, 1977年生, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市人, 汉族, 2002年新疆医科大学毕业, 硕士, 副主任医师, 主要从事脊柱外科方面的研究。

通讯作者: 李辉, 硕士, 主治医师, 临汾市人民医院心脏大血管外科, 山西省临汾市 041000

<https://orcid.org/0000-0002-6205-9601> (谢江)

基金资助: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2020D01C195), 项目负责人: 谢江

引用本文: 谢江, 代杰, 李辉, 朱旭. 基于骨盆矢状位参数恢复强直性脊柱后凸矢状面平衡的生物力学分析[J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(30):4762-4766.



Abstract

BACKGROUND: As kyphosis is mainly manifested as sagittal deformity. The angle of osteotomy is one of the key problems to be solved before operation. Insufficient and excessive correction of angle may cause secondary imbalance of sagittal spine.

OBJECTIVE: To establish a three-dimensional finite element model of kyphotomy for ankylosing spondylitis by using computer-aided software, design a personalized surgical scheme based on pelvic sagittal parameters, restore sagittal balance, and analyze biomechanical characteristics.

METHODS: CT data from C₁ to sacrococcyx of a hospitalized patient from the Sixth Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University were collected. According to 301 classification, kyphosis was determined as IIIA type. CT data were imported into computer modeling software to establish a three-dimensional finite element model of ankylosing spondylitis kyphosis. The values of pelvic incidence and pelvic tilt were measured, and the angle of theoretical pelvic tilt was calculated by pelvic incidence. Two different osteotomy models were designed. In model 2, the pre-osteotomy angle of L₃ measured by hilar hip axis measurement was 32.2°. In model 1, and the osteotomy angle was set at 40° under the sagittal plane balance without reconstruction. The cancellous osteotomy was simulated on the two models; and the finite element calculation was carried out on the nail rod system and osteotomy surface of the model after osteotomy.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) Finite element analysis results showed that in the condition of spinal flexion, except S₁ segment, the screw stress of model 1 of the other five fixed segments was higher than that of model 2, and the stress of titanium rod and bone connecting surface was also the same. (2) In the condition of spinal extension, due to too large osteotomy angle, the patient's center of gravity moved backward, resulting in more obvious stress difference between the two. The largest distance was L₄ segment screw, and the difference was 149.69 MPa between model 1 and model 2. (3) The stress diagram of osteotomy surface showed that the stress mainly concentrated in the rear of the osteotomy surface, while the stress in the front was generally less than 12 MPa. (4) It is a reasonable and scientific surgical plan to restore sagittal balance of ankylosing kyphosis based on pelvic sagittal parameters, which can ensure the orthopedic effect and reduce the stress distribution.

Key words: ankylosing spondylitis; pelvic; sagittal parameters; biomechanics; sagittal balance

Funding: the Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region, No. 2020D01C195 (to XJ)

How to cite this article: XIE J, DAI J, LI H, ZHU X. Biomechanical analysis of sagittal balance restoration of ankylosing kyphosis based on pelvic sagittal parameters. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2021;25(30):4762-4766.

0 引言 Introduction

强直性脊柱后凸是强直性脊柱炎的严重并发症，它可导致脊柱矢状面或合并冠状面畸形^[1-2]，过去强直性脊柱后凸手术治疗目的往往是恢复患者平视、平卧、解除胸腹腔脏器的压迫，对于恢复矢状面平衡并没有进行深入的研究。随着脊柱外科的不断发展，重建脊柱矢状面平衡受到更多专家学者的重视，而矢状面平衡的构成中，骨盆矢状位参数对维持正常的脊柱生物力学至关重要。临床工作中很多脊柱外科医师将骨盆矢状位参数作为腰椎手术治疗的重要参考因素之一^[3]，但是骨盆矢状位参数对矫正强直性脊柱后凸手术的生物力学影响未见报道，故此次研究收集强直性脊柱后凸患者的CT数据，通过计算机辅助工程软件(Mimics 22.0、UG NX 8.5、Geomagic Studio 2013、Ansys workbench 15.0)建立了结构完整的强直性脊柱后凸三维模型，分别模拟恢复矢状面平衡和未恢复矢状面平衡两种手术方式，在模型上进行模拟截骨、安装内固定，输入有限元分析软件Ansys workbench 15.0进行分析，得出数据，综合分析和比较相关生物力学参数。

1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 三维有限元建模，计算机模拟，单样本实验。

1.2 时间及地点 于2020年6至10月在新疆医科大学第六附属医院脊柱外科完成。

1.3 对象 于新疆医科大学第六附属医院脊柱外科选择1例强直性脊柱炎后凸患者，30岁，身高172 cm，体质量70 kg。拍摄脊柱全长X射线片，并对患者进行CT平扫，范围从C₁至骶尾骨，计算出Cobb角为30.9°，胸椎后凸角为77.5°，胸腰段后凸角为21.0°，且腰椎前凸角<0°。该病例301分型为IIIA型(胸椎后凸型)^[4]，排除脊柱及脊髓其他异常，结合病史及辅助检查确诊为强直性脊柱炎后凸畸形，诊断明确后，向患者及家属讲解实验过程和目的，征得同意后签署知情同意书。

1.4 材料

建模软件: Mimics 22.0 用于CT数据重建，生成医学模型的三角面片结构；应用Geomagic Studio 2013对模型数据进行封装、错误检查及优化，并重建Nurbs曲面模型；UGNX 8.5用于调整各部件之间的位置关系，分割模型，装配内固定模型，进行手术模拟操作；Ansys workbench 15.0用于三维有限元模型的建立及分析。

1.5 方法

1.5.1 强直性脊柱炎后凸三维模型建立 对患者C₁至骶尾骨行CT薄层扫描，共获取间隔1 mm，重建厚度0.5 mm，平面分辨率512×512，每像素0.873 mm的二维断层图像2 434张，保存为DICOM格式的文件。输入到建模软件(Mimics 22)建立原始三维模型(图1)，再应用Geomagic Studio 2013软件，优化模型，使模型有利于后期的有限元建模。应用UG NX 8.5建立脊柱实体模型，利用软件的实体功能切除部分无用的骶骨实体模型，在C₁顶部建立载荷平面，以方便受力情况的设置，使用曲线和草图功能，建立连接椎体之间的钙化韧带模型，完成强直性脊柱炎后凸三维模型的建立。

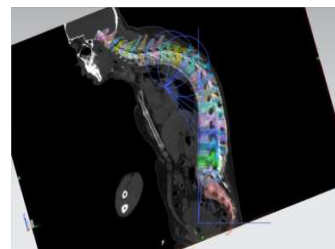


图1 | 骨盆矢状位参数测量图
Figure 1 | Measurement of pelvic sagittal parameters

1.5.2 模型验证 为了增加模型的准确性，利用上述模型进行有效性验证，模拟人体仰卧位，屈曲过伸、旋转，分析10 N•m纯扭矩下各节段的角度，并与相关文献进行对比，结果均在正常范围之内^[5-6]。

1.5.3 重建脊柱矢状面平衡截骨角度的计算 测量骨盆入射角为35.4°，骨盆倾斜角为6.1°，理论骨盆倾斜角=骨盆入射

角 $\times 0.37-7^\circ$ 。目前临床常用的恢复矢状面平衡计算方法为肺-髓轴计算法^[7]，通过全脊柱侧位 X 射线片上定位肺门以及髓轴的中点，并在后凸模型上模拟出相应的位置，绕截骨顶点旋转肺门至躯体重力线上，旋转的角度即为预截骨角度，通过计算测量得出，在 L₃ 椎体上预截骨角度为 32.2°(图 2)，矫正后的骨盆倾斜角为 6°，骨盆入射角为 39.7°。未重建脊柱矢状面平衡模型于 L₃ 椎体进行模拟截骨，其截骨角度选择为 40°，术后骨盆入射角为 36.9°，骨盆倾斜角为 9.5°。

1.5.4 后凸截骨模型的设计 在原始模型 L₃ 椎体上模拟去松质骨截骨，切除范围包括椎体后方棘突、上下关节突、椎板，并对目标椎体进行 Y 形截骨，截骨后闭合后方截骨间隙，前方张开(图 3)，2 个模型截骨角度为 32.2°(模型 2)和 40°(模型 1)。并使用 UG NX 8.5 软件安装螺钉和钛棒，以截骨椎体上下 3 个节段安装 12 枚椎弓根螺钉 + 钛棒固定(图 4, 5)。

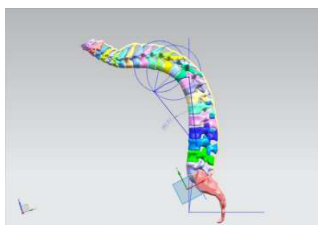


图 2 | L₃ 椎体截骨角度测量图
Figure 2 | Measurement of osteotomy angle of lumbar vertebrae 3

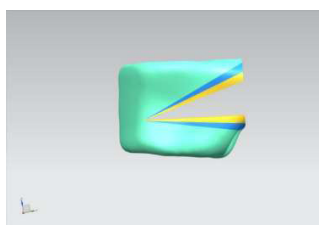


图 3 | 截骨手术操作图
Figure 3 | Operation chart of osteotomy

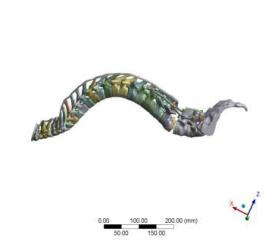


图 4 | 未重建脊柱矢状面平衡的截骨模型图(截骨角度 40°)
Figure 4 | Sagittal balance model of the reconstructed spine (osteotomy angle: 40°)



图 5 | 恢复脊柱矢状面平衡的截骨模型图(截骨角度 32.2°)
Figure 5 | Model of sagittal balanced osteotomy (osteotomy angle: 32.2°)

1.5.5 有限元分析 将所建立的强直性脊柱炎后凸截骨模型导入有限元软件 Ansys workbench 15.0 中，进行有限元网格划分，并查阅文献添加椎间盘及韧带结构，由于强直性脊柱炎后凸患者椎间盘、韧带严重骨化^[8]，故采用同松质骨相同的材料参数(表 1)。对最下端的骶骨进行全约束，对 C₁ 进行载荷设定，表面施加 75 N 预载荷，1.8 N·m 的纯力矩，使模型产生前屈、后伸、左右侧弯、左右旋转 6 种动作，计算脊柱六向活动下内固定和截骨面的应力，并与未重建脊柱矢状面平衡模型六向活动下内固定和截骨面的应力进行对比。

1.6 主要观察指标 通过有限元计算分析两种模型在脊柱动力位下脊柱内固定、截骨接触面的应力以及脊柱的位移数据。

表 1 | 脊椎，椎间盘及韧带和内固定材料参数^[9-10]

Table 1 | Parameters of spine, intervertebral disc and ligament and internal fixation materials

组织	弹性模量 (MPa)	泊松比
皮质骨	12 000	0.3
松质骨	12 000	0.3
椎间盘	12 000	0.3
韧带	12 000	0.3
螺钉	1.034×10 ⁵	0.35
钛棒	1.034×10 ⁵	0.35

2 结果 Results

椎弓根螺钉、钛棒的应力分布趋势: 通过分析计算得出，在脊柱前屈工况下，模型 1(截骨角度 40°)螺钉应力集中在截骨椎上下固定节段，内固定节段越靠近尾端，螺钉应力分布越小，其应力大小顺序为: L₂ > L₄ > L₅ > L₁ > S₁ > T₁₂。与模型 2(截骨角度 32.2°)相比，6 个固定节段中，除 S₁ 外，其他 5 个固定节段的螺钉应力均要高于后者(表 2)，钛棒和截骨面应力亦是如此。

表 2 | 前屈工况下内固定和截骨接触面的等效应力和位移

Table 2 | Equivalent stress and displacement of contact surface between internal fixation and osteotomy under flexion condition

指标	模型 1	模型 2	均值
T ₁₂ 固定节段左侧螺钉应力 (MPa)	45.12	40.46	42.79
L ₁ 固定节段左侧螺钉应力 (MPa)	90.35	82.33	86.34
L ₂ 固定节段左侧螺钉应力 (MPa)	214.43	185.79	200.11
L ₄ 固定节段左侧螺钉应力 (MPa)	197.45	185.24	191.34
L ₅ 固定节段左侧螺钉应力 (MPa)	104.52	102.78	103.65
S ₁ 固定节段左侧螺钉应力 (MPa)	84.31	88.06	86.18
左侧钛棒应力 (MPa)	188.15	164.84	176.49
截骨面应力 (MPa)	34.68	31.87	33.27
位移 (mm)	2.47	0.95	1.71

表注: 模型 2 使用肺门-髓轴测量方法(重建矢状面平衡)测量 L₃ 预截骨角度为 32.2°，模型 1 则在未重建矢状面平衡下设置截骨角度为 40°

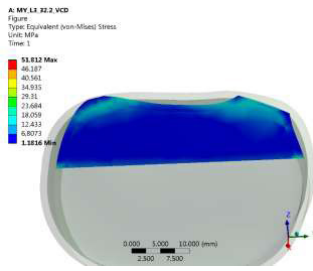
在脊柱后伸工况中，由于截骨角度过大，结果患者重心后移，导致模型 1 和模型 2 应力差异较为明显，其中差距最大的为 L₄ 节段螺钉，差异为 149.69 MPa，并且后伸工况的应力均高于前屈工况(表 3); 截骨面的应力图也能看出，应力主要集中于截骨面的后方，而前方的应力普遍在 12 MPa 以下(图 6-10)。

表 3 | 后伸工况下内固定和截骨接触面的等效应力和位移

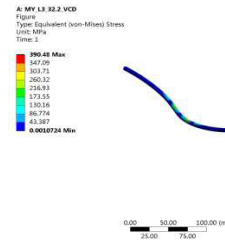
Table 3 | Equivalent stress and displacement of contact surface between internal fixation and osteotomy under extension condition

指标	模型 1	模型 2	均值
T ₁₂ 固定节段左侧螺钉应力 (MPa)	41.14	48.42	44.78
L ₁ 固定节段左侧螺钉应力 (MPa)	99.66	92.37	96.01
L ₂ 固定节段左侧螺钉应力 (MPa)	457.23	317.79	387.51
L ₄ 固定节段左侧螺钉应力 (MPa)	484.05	338.36	411.20
L ₅ 固定节段左侧螺钉应力 (MPa)	194.59	171.74	183.16
S ₁ 固定节段左侧螺钉应力 (MPa)	139.31	100.66	119.98
左侧钛棒应力 (MPa)	455.11	390.48	422.55
截骨面应力 (MPa)	64.58	51.81	58.19
位移 (mm)	3.41	2.87	3.14

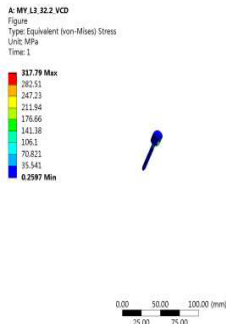
表注: 模型 2 使用肺门-髓轴测量方法(重建矢状面平衡)测量 L₃ 预截骨角度为 32.2°，模型 1 则在未重建矢状面平衡下设置截骨角度为 40°



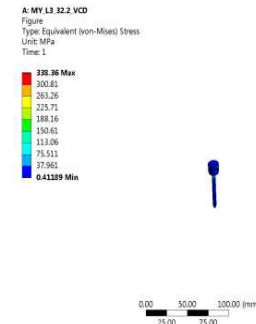
图注：截骨应力集中于截骨面后方
图 6 | 重建矢状面平衡模型截骨接触面的等效应力图（后伸工况）
Figure 6 | Equivalent stress diagram of osteotomy contact surface of reconstructed sagittal balance model (extension condition)



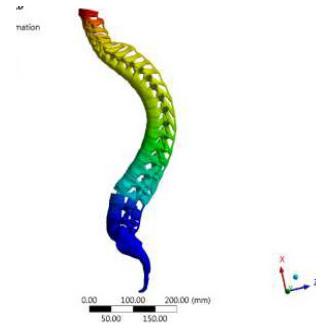
图注：左侧钛棒应力集中在截骨节段相邻固定节段
图 7 | 重建矢状面平衡模型截骨左侧钛棒的等效应力图（后伸工况）
Figure 7 | Equivalent stress diagram of titanium rod on the left side of osteotomy (extension condition)



图注：螺钉应力集中在螺帽与螺钉连接部分
图 8 | 重建矢状面平衡模型截骨 L₂ 左侧螺钉的等效应力图（后伸工况）
Figure 8 | Equivalent stress diagram of osteotomy screw of reconstructed sagittal balance model (left screw of L₂, extension condition)



图注：螺钉应力集中在螺帽与螺钉连接部分
图 9 | 重建矢状面平衡模型截骨 L₄ 左侧螺钉的等效应力图（后伸工况）
Figure 9 | Equivalent stress diagram of osteotomy screw of reconstructed sagittal balance model (left screw of L₄, extension condition)



图注：脊柱整体位移表现为从 C₁ 至骶尾骨依次递减趋势
图 10 | 重建矢状面平衡模型位移图（后伸工况）
Figure 10 | Displacement map of reconstructed sagittal balance model (extension condition)

3 讨论 Discussion

强直性脊柱后凸是一类矢状面畸形、严重的可形成冠状面的畸形^[11]，其形态与正常的脊柱差异很大，早期外科手术的目的在于恢复患者的平视功能，解除对胸腹腔脏器的压迫^[12-13]，但是随着研究的不断深入，恢复患者的矢状面平衡成为手术治疗的重要目的。强直性脊柱畸形患者往往合并矢状面后凸畸形，这会导致患者的重心前移，导致患者无法直立行走，甚至需要屈曲髋关节或者膝关节以代偿重心发生的改变^[14]，久而久之，会导致下肢关节发生退变。外科手术的目的在于恢复患者的矢状面平衡，使患者重心重新恢复于矢状位骨盆中立线上^[15-16]，但是过大或者过小的截骨角度都无法使患者重心重新恢复于矢状位中立线上，过大的截骨角度会使患者重心由前移变为后移，过小的截骨角度则会使患者重心仍位于前方，这些都会导致患者脊柱二次失衡，因此如何能够个性化设计截骨方案是术者术前需要解决的关键问题。

金海明等^[7]在脊柱矢状面畸形截骨角度计算方法的研究进展中指出，恢复脊柱矢状面平衡的截骨角度计算方法包括三角法、精确角度计算法、躯干整体平衡法、脊柱股骨角测量法、数字虚拟法、图解法、外耳道-髌轴测量法和肺门-髌轴测量法。具体如下：①三角法与精确角度计算法以 C₇ 椎体中心作为影像学标记，仅是脊柱矢状面序列的重建，该方法简便易操作，适用于 Cobb 角较小、且不伴有骨盆代偿改变的患者；②躯干整体平衡法和脊柱股骨角测量法兼顾了骨盆与下肢矢状面排列的代偿，符合矢状面平衡矫正的原理；③数字虚拟法更侧重于颈椎强直的强直性脊柱后凸患者的角度计算^[17]；

④外耳道-髌轴测量法和肺门-髌轴测量法则根据人体解剖结构和生物力学特点使用肺门与髌轴的关系作为平衡标准，相比前几种测量方法更为科学，并且两种方法运用理论骨盆倾斜角作为骨盆中立位恢复标准，其特异性更强，可得到更为准确的截骨角度。

外耳道-髌轴测量法和肺门-髌轴测量法两种方法中以肺门-髌轴测量法使用更加简便易行，但是需要有经验的放射科医师辅助准确定位肺门的位置，此次研究中患者强直性脊柱后凸畸形为车轮状或大“C”状后凸畸形，301 分型为胸椎后凸型，肺门-髌轴测量法更适用于截骨角度的计算方式。具体测量方式是通过骨盆入射角预测骨盆位置性参数骨盆倾斜角并标记骨盆中立位线，以截骨椎体前缘旋转中心，将躯干重心标记（肺门）重置于骨盆中立位线上进行截骨设计，可取得确切的临床疗效，而确保骨盆中立位是强直性脊柱炎后凸矢状面平衡重建的最终目标，为此，作者在计算机上模拟出肺门的位置，计算预截骨角度，根据计算好的截骨角度进行模拟截骨。

目前针对于车轮状后凸畸形患者，截骨椎体的选择可分为胸椎截骨和腰椎截骨，由于截骨角度的大小受到截骨椎体选择的影响，理论上，越靠近尾端截骨矫正效果越显著，截骨角度也越小^[18-19]。在临床上多数脊柱外科医师会选择腰椎截骨，不仅是因为较小的截骨角度可以减少手术操作、降低手术出血、缩短手术时间；另一方面，由于腰椎椎管容积较大，并且内容物为马尾神经，不易损伤脊髓，截骨后还可保持腰椎生理性前凸^[20-22]，因此选择腰椎为目标截骨椎更符合临床手术原则。

此次研究结果提示,对于是否重建矢状面平衡的两种模型内固定应力对比,以前屈和后伸两种工况为例,在脊柱前屈工况下,模型1(截骨角度 40°)螺钉应力集中在截骨节段上下固定节段,内固定节段越靠近尾端,螺钉应力分布越小,其应力大小顺序为: $L_2 > L_4 > L_5 > L_1 > S_1 > T_{12}$,与模型2(截骨角度 32.2°)相比较,6个固定节段中,除 S_1 外,其他5个固定节段的螺钉应力均要高于后者,钛棒和接骨面应力亦是如此;在脊柱后伸工况中,由于截骨角度过大,结果患者重心后移,导致两者应力差异较为明显,模型2其应力大小顺序为: $L_4 > L_2 > L_5 > S_1 > L_1 > T_{12}$,其中差距最大的为 L_4 节段螺钉,差异为 149.69 MPa ,并且后伸工况的应力均高于前屈工况,截骨面的应力图也能看出,应力主要集中于截骨面的后方,而前方的应力普遍在 12 MPa 以下。此外,通过应力图也能发现,钛棒的应力主要集中于截骨端上下相邻固定节段,而螺钉的应力则集中于螺帽与螺钉连接部分,这与临床中内固定最常见的断裂位置相似。

综上,由于强直性脊柱后凸患者脊柱形态差异大,个性化手术方案设计是决定手术成败和术后疗效的关键,近年来手术重建患者矢状面平衡受到更多脊柱外科医师的关注^[23-25]。由于人体矢状面平衡主要由脊柱序列、骨盆以及下肢组成,此次研究引入骨盆矢状位参数重建患者矢状面平衡去设计手术方案,更加合理、科学^[26-27],通过生物力学分析也可以得出,基于骨盆矢状位参数恢复强直性脊柱后凸矢状面平衡的应力分布更低,术后脊柱稳定性更好。

此次研究引入骨盆矢状位参数来设计手术方案,并与模型1方案进行相关数据有限元分析对比,对临床术前手术规划、术后矫形效果预判有一定的指导意义;局限性在于仅纳入一种后凸类型,针对于其他分型的病例没有进一步研究,后续还将纳入更多分型病例,甚至合并冠状位畸形的患者进行深入研究分析^[28-29],形成一套理论体系。

作者贡献: 李辉负责实验设计,谢江负责实验实施,代杰、朱旭负责评估。
经费支持: 该文章接受了“新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2020D01C195)”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: 文章的全部作者声明,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: 该研究方案的实施符合《赫尔辛基宣言》和新疆医科大学第六附属医院对研究的相关伦理要求。

知情同意问题: 参与实验的患病个体及其家属为自愿参加,对实验过程完全知情同意,并签署了“知情同意书”。

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表宗旨。

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。

- [2] WANG T, ZHAO Y, LIANG Y, et al. Risk factor analysis of proximal junctional kyphosis after posterior osteotomy in patients with ankylosing spondylitis. *J Neurosurg Spine*. 2018;29(1):1-6.
- [3] WEINBERG DS, XIE KK, LIU RW, et al. Increased Pelvic Incidence is Associated With a More Coronal Facet Orientation in the Lower Lumbar Spine A Cadaveric Study of 599 Lumbar Spines. *Spine*. 2016;41(19):E1138-1134.
- [4] 郑国权,张永刚,王岩,等.强直性脊柱炎后凸畸形的301分型[J].中国脊柱脊髓杂志,2015,25(9):8-13.
- [5] JONES AC, WILCOX RK. Finite element analysis of the spine: Towards a framework of verification, validation and sensitivity analysis. *Med Eng Phys*. 2008;30(10):1287-1304.
- [6] HEDENSTIERNA S, HALLDIN P, SIEGMUND GP. Neck muscle load distribution in lateral, frontal, and rear-end impacts: a three-dimensional finite element analysis. *Spine*. 2009;34(24):2626-2633.
- [7] 金海明,王向阳.脊柱矢状面畸形截骨角度计算方法的研究进展[J].中华骨科杂志,2016,36(5):298-306.
- [8] BEHARI S, TUNGERIA A, JAISWAL AK, et al. The “moustache” sign: Localized intervertebral disc fibrosis and panligamentous ossification in ankylosing spondylitis with kyphosis. *Neurol India*. 2010;58(5):764.
- [9] BURSTEIN AH, REILLY DT, MARTENS M. Aging of bone tissue: mechanical properties. *J Bone Joint Surg Am*. 1976;58(1):82-86.
- [10] SHIRAZI-ADL SA, SHRIVASTAVA SC, AHMED AM. Stress Analysis of the Lumbar Disc-Body Unit in Compression A Three-Dimensional Nonlinear Finite Element Study. *Spine*. 1984;9(2):120-134.
- [11] FABIAN P, DENIS P. Ankylosing spondylitis and axial spondyloarthritis: recent insights and impact of new classification criteria. *Ther Adv Musculoskelet Dis*. 2018;10(5-6):129-139.
- [12] CHIN CM, TZENG ST. Pedicle subtraction osteotomy in lateral decubitus position to correct severe kyphosis in patient with ankylosing spondylitis-Case report. *Form J Musculoskelet Disord*. 2019;10(2):69-73.
- [13] KOU J, GUO J, JI X, et al. A posterior-only approach for ankylosing spondylitis (AS) with thoracolumbar pseudoarthrosis: a clinical retrospective study. *BMC Musculoskelet Disord*. 2020;21(1):370-376.
- [14] TIANHAO W, YONGFEI Z, GUOQUAN Z, et al. Can pelvic tilt be restored by spinal osteotomy in ankylosing spondylitis patients with thoracolumbar kyphosis? A minimum follow-up of 2years. *J Orthop Surg Res*. 2018;13(1):172-176.
- [15] YLDZ F. Results of closing wedge osteotomy in the treatment of sagittal imbalance due to ankylosing spondylitis. *Acta Orthopaedica Et Traumatologica Turcica*. 2016;50(1):63.
- [16] ZHENG G, SONG K, YAO Z, et al. How to Calculate the Exact Angle for Two-level Osteotomy in Ankylosing Spondylitis? *Spine*. 2016;41(17):E1046-E1052.
- [17] WANG T, SONG D, ZHENG G, et al. Staged cervical osteotomy: a new strategy for correcting ankylosing spondylitis thoracolumbar kyphotic deformity with fused cervical spine. *J Orthop Surg Res*. 2019;14(1):108-113.
- [18] 钱邦平,黄季晨,邱勇,等.截骨矫形术治疗强直性脊柱炎颈胸段畸形的疗效分析[J].中华骨科杂志,2018,38(4):204-211.
- [19] 钱邦平,邱勇.强直性脊柱炎颈胸段后凸畸形合并胸腰腰后凸畸形截骨顺序的选择[J].中国脊柱脊髓杂志,2018,28(8):673-674.
- [20] 陈遥,洪正华,洪盾,等.保留中柱经椎弓根开合式截骨术治疗强直性脊柱炎后凸畸形[J].中华骨科杂志,2018,38(22):1349-1356.
- [21] 李长明,赵士杰,许建柱,等.经椎弓根楔形截骨联合长节段椎弓根螺钉固定治疗强直性脊柱炎后凸畸形合并胸腰段骨折的短期疗效[J].中华创伤杂志,2019,35(6):501-507.
- [22] 齐鹏,宋凯,张永刚,等.单节段脊柱去松质骨截骨与双节段经椎弓根截骨矫正强直性脊柱炎后凸畸形的临床效果比较[J].中国脊柱脊髓杂志,2015,25(9):775-780.
- [23] 胡东,宁旭.脊柱-骨盆矢状面参数与腰椎椎间盘突出症相关性研究进展[J].脊柱外科杂志,2020,18(1):64-67.
- [24] 马庆宏,刘蔚,叶林辉,等.颈椎前路椎间盘切除融合术对颈椎矢状面平衡改变和疗效分析[J].南京医科大学学报(自然科学版),2017,37(12):1597-1600.
- [25] 陈康明,黄钢勇,赵广雷,等.脊柱矢状面平衡对髌臼假体朝向的影响及其临床意义[J].中华骨科杂志,2020,40(2):103-109.
- [26] 李辉,高晓玲,马原.不同截骨节段重建III A型强直性脊柱后凸矢状面平衡的生物力学分析[J].中国组织工程研究,2020,24(30):4824-4828.
- [27] 李辉,张鹏,尚俊,等.去松质骨截骨术与全脊柱截骨术治疗强直性脊柱炎后凸畸形有限元分析[J].山西医科大学学报,2019,50(3):122-126.
- [28] 仇建国,邱贵兴,于斌,等.后路半椎体切除术前治疗先天性脊柱侧后凸的初步结果[J].中华骨科杂志,2006,26(3):156-160.
- [29] 仇建国,邱贵兴,刘勇,等.前路一期半椎体切除术前矫治脊柱侧后凸[J].中华骨科杂志,2004,24(5):257-261.

4 参考文献 References

[1] BRAUN J, SIEPER J. Ankylosing Spondylitis. *Lancet*. 2007;369(9570):1379-1390.

(责任编辑: GD, ZN, ZH)