

全脊椎截骨重建强直性脊柱后凸矢状面平衡的有限元分析

https://doi.org/10.12307/2021.311 谢江¹, 郭惠丽², 李辉³, 代杰¹, 朱旭¹

投稿日期: 2021-01-28

送审日期: 2021-01-30

采用日期: 2021-03-12

在线日期: 2021-04-20

中图分类号:

R459.9; R318; R452

文章编号:

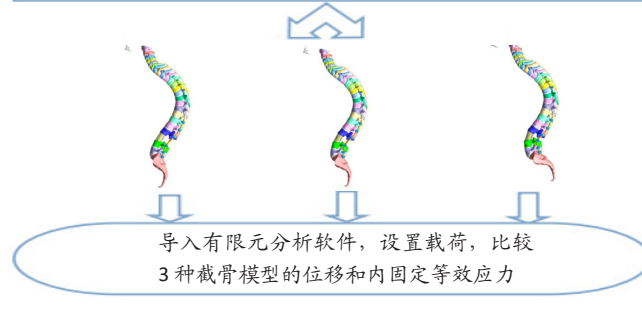
2095-4344(2021)33-05259-06

文献标识码: A

文章快速阅读:

采用 CT 扫描获取强直性脊柱后凸 DICOM 格式图像

通过计算机重建技术分别建立 VCR30°, VCR32.2°, VCR40° 三维有限元模型



文题释义:

全脊椎截骨(vertebral column resection, VCR): 后路全脊椎截骨技术已在国内外广泛应用于严重脊柱侧后凸畸形的外科矫形。VCR技术的核心操作是后路对单个或多个椎体及其上下相邻椎间盘的完整切除, 通过单次手术即可获得较高的侧凸和后凸矫正率, 并且对术前有脊髓压迫症状的患者在截骨矫形的同时可行脊髓充分减压。

强直性脊柱后凸: 僵硬性脊柱畸形的一种, 病因为强直性脊柱炎, 根据畸形位置的不同可分为四型, 治疗主要手段是手术矫形, 手术目的是恢复前视和脊柱矢状面上的平衡。

摘要

背景: 过去强直性脊柱后凸矫形往往注重局部畸形的矫正, 忽略对于矢状面平衡的重建。

目的: 应用计算机辅助软件建立强直性脊柱后凸三维有限元模型, 基于肺门-髋轴法重建脊柱矢状面平衡, 设计个性化手术截骨方案, 并模拟全脊椎截骨手术操作, 计算分析其生物力学特性, 并与两种未重建脊柱矢状面平衡模型进行对比。

方法: 收集来自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。设计3种不同全脊椎截骨(VCR)手术方案的模型, 分别为VCR30°, VCR32.2°和VCR40°, 其中VCR32.2°使用肺门-髋轴测量方法测量L₃预截骨角度为32.2°, 另外构建2个未重建脊柱矢状面平衡模型, 其中VCR30°设置为截骨角度为30°, VCR40°设置截骨角度为40°, 在构建完成的3个模型上模拟全脊椎截骨术进行截骨, 并对截骨矫形后3个模型的脊柱位移、钉棒系统、钛笼和截骨面进行有限元计算。

结果与结论: ①总位移和24个椎体位移大小排序如下: VCR40° > VCR30° > VCR32.2°, VCR40°明显高于VCR32.2°, VCR30°和VCR32.2°两者由于截骨角度差异小, 位移差距不显著; 椎弓根螺钉、钛棒、钛笼以及截骨接触面的应力分布趋势; ②不论是钉棒应力, 还是钛笼应力, VCR40°都要高于其他2个模型和平均值, 并且差异明显, VCR32.2°在3种模型中应力最小, 也低于平均值, 并且各节段等效应力分布均匀, 没有出现应力集中的现象; ③结果证实, 基于肺门-髋轴法重建脊柱矢状面平衡能够增加术后脊柱稳定性, 且内固定应力分布更低, 是一种合理、科学的手术方案设计。

关键词: 强直性脊柱后凸; 全脊椎截骨; 有限元分析; 矢状面平衡; 生物力学; 模型; 畸形; 骨盆参数

Finite element analysis of reconstruction of sagittal balance in ankylosing kyphosis with vertebral column resection

Xie Jiang¹, Guo Huili², Li Hui³, Dai Jie¹, Zhu Xu¹

¹First Department of Spinal Surgery, The Sixth Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830001, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China;

²Urumqi Center for Disease Control and Prevention, Urumqi 830000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China; ³Department 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

¹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乌鲁木齐市疾控中心, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830000;

³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, 男, 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。

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(2020D01C195), 项目负责人: 谢江

引用本文: 谢江, 郭惠丽, 李辉, 代杰, 朱旭. 全脊椎截骨重建强直性脊柱后凸矢状面平衡的有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(33):5259-5264.



Abstract

BACKGROUND: In the past, the correction of ankylosing kyphosis often focused on the correction of local deformities, ignoring the reconstruction of sagittal balance. **OBJECTIVE:** To establish a three-dimensional finite element model of ankylosing spondylitis kyphosis by using computer-aided software, design a personalized osteotomy scheme based on the reconstruction of sagittal balance of spine by hilum hip axis method, simulate the operation of vertebral column resection (VCR), calculate and analyze its biomechanical characteristics, and compare with two kinds of sagittal balance models without reconstruction. **METHODS:** CT data of an inpatient from the Sixth Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University were collected. According to 301 classification, kyphosis was identified as IIIA. The CT data were imported into computer modeling software to establish a three-dimensional finite element model of ankylosing kyphosis. Three different surgical models were designed, which were VCR30°, VCR32.2° and VCR40°, in which VCR32.2° was used to measure the pre osteotomy angle of L_3 , which was 32.2° using the measurement method of hilum hip axis. In addition, two non-reconstructed spinal sagittal plane balance models were constructed, in which VCR30° was set as the osteotomy angle 30° and VCR40° was set as the osteotomy angle 40° to simulate VCR in the three models. The spinal displacement, screw rod system, titanium cage and osteotomy surface of the three models were calculated by finite element method. **RESULTS AND CONCLUSION:** (1) The order of total displacement and displacement of 24 vertebral bodies was VCR40° > VCR30° > VCR32.2°; VCR40° was significantly higher than VCR32.2°; VCR30° and VCR32.2° had no significant displacement difference due to the small difference of osteotomy angle. (2) The stress distribution trend of pedicle screw, titanium rod, titanium cage and osteotomy contact surface: no matter titanium rod or titanium cage, VCR40° was higher than the other two models and the average, and the difference was significant. VCR32.3° had the smallest stress in the three models, and was lower than the average value. The equivalent stress distribution of each segment was uniform, and there was no stress concentration. (3) Results confirmed that reconstruction of sagittal balance of spine based on hilum hip axis method can increase postoperative spinal stability, and lower stress distribution of internal fixation, which is a reasonable and scientific surgical design.

Key words: ankylosing kyphosis; vertebral column resection; finite element analysis; sagittal balance; biomechanics; model; deformity; pelvic parameters

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

How to cite this article: XIE J, GUO HL, LI H, DAI J, ZHU X. Finite element analysis of reconstruction of sagittal balance in ankylosing kyphosis with vertebral column resection. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2021;25(33):5259-5264.

0 引言 Introduction

强直性脊柱后凸属于僵硬性脊柱后凸畸形，是强直性脊柱炎晚期的严重并发症，手术治疗方法包括：经关节突截骨 (Smith-Petersen osteotomy, SPO)、经椎弓根椎体截骨 (pedicle subtraction osteotomy, PSO) 及全脊椎截骨术 (vertebral column resection, VCR) 等。SPO 截骨未涉及到脊椎前中柱，仅能矫正 10° 后凸畸形，如需要矫正更大角度的后凸畸形，则需要进行多节段截骨，不仅增加手术时间，还易于引起神经和血管损伤。PSO 截骨术对截骨间隙进行闭合，稳定性更佳，该方法一般仅可以矫正约 40° 的后凸畸形^[1-2]。以上两种手术方式是适用于角度小于 40° 并且不合并冠状位畸形的单纯后凸患者。VCR 截骨通过对目标节段椎体切除，不仅可以矫正 40° 以上的后凸畸形，针对于合并冠状面畸形的患者，可以进行 360° 矫形，是目前治疗严重后凸畸形的理想方法^[3-4]。

脊柱正常的序列是维持矢状面平衡的重要因素，手术不单纯是为了矫正后凸畸形，对于维持正常的脊柱矢状面平衡是重要的手术目的^[5]，截骨角度过大或者过小都有可能影响患者手术后的脊柱生物力学，但是具体如何影响生物力学未见相关研究。肺门-髋轴测量法能够重建后凸脊柱矢状面平衡，使患者的重心重新恢复于矢状位骨盆中立线上，该课题组前期在脊柱建模和脊柱畸形生物力学分析方面做了相关研究^[6-7]，已经积累了一定的经验。该研究收集 1 例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 NX8.5, 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，分别模拟基于肺门-髋轴测量法恢复矢状面平衡和未恢复矢状面平衡 3 种手术方式，在模型上进行模拟 VCR 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，综合分析和比较生物力学参数。

1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 计算机模拟，有限元分析试验，描述性分析。

1.2 时间及地点 于 2020 年 6 月至 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 纳入新疆医科大学第六附属医院脊柱外科住院患者 1 例，年龄 30 岁，身高 172 cm，体质量 70 kg；主诉：腰背部疼痛 5 年，夜间疼痛症状加重；实验室检查提示：HLA-B27 阳性；入院后拍摄脊柱全长正侧位片显示：脊柱呈竹节样改变，双侧骶髂关节炎，磁共振扫描未见明显异常，根据强直性脊柱后凸诊断标准^[8]，一项典型临床表现结合影像学表现可确诊。在全脊柱 X 射线片进行矢状面参数测量，Cobb 角度为 30.9°，胸椎后凸角 = 77.5°，胸腰段后凸角 = 21.0°，腰椎前凸角 < 0°，该病例 301 分型为 III A 型 (胸椎后凸型)^[4]。向患者及家属讲解试验过程和目的，征得同意后签署知情同意书。该研究经新疆医科大学第六附属医院伦理委员会批准，伦理批准号：LFYLLSC20191231-03)，批准时间：2020-12-30。

建模软件: Mimics 22.0 (Materialise 公司) 用于 CT 数据重建，生成医学模型的三角面片结构，Geomagic Studio 2013 (Geomagic 公司) 对模型数据进行封装、错误检查及优化，并重建 Nurbs 曲面模型。UG NX8.5 (西门子) 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。

1.4 方法

1.4.1 强直性脊柱炎后凸三维模型的构建 对患者行 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，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 NX8.5 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。

1.4.2 重建脊柱矢状面平衡截骨角度的计算 测量骨盆入射角 (PI) 为 35.4°, 骨盆倾斜角 (PT) 为 6.1°, 通过计算 $PI \times 0.37 - 7^\circ$ 得出理论 PT 值 (tPT), 见图 1。目前临床常用的恢复矢状面平衡计算方法为肺门-髌轴计算法^[9], 通过全脊柱侧位 X 射线片上定位肺门以及髌轴的中点, 并在后凸模型上模拟出相应的位置, 并绕截骨顶点旋转肺门至躯体中立位线上, 旋转的角度即为预截骨角度。

1.4.3 截骨模型的设计 在原始模型 L₃ 椎体上进行模拟全脊椎截骨术, 切除范围包括椎体后方棘突、上下关节突、椎板、全部椎体、上下位的椎间盘、前纵韧带、后纵韧带、棘间韧带、棘上韧带和黄韧带, 选择钛笼支撑截骨后间隙, 钛笼内部填充松质骨, 3 个模型截骨角度为 32.2°(VCR32.2°)、30°(VCR30°) 和 40°(VCR40°)。其中 30° 为过小截骨角度, 40° 为过大截骨角度, 两种截骨角度均可导致脊柱二次失衡, 32.2° 是恢复矢状面平衡的截骨角度。并使用 UG NX8.5 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。通过计算测量得出, 在 L₃ 椎体上预截骨角度分别为: 32.2°, 对照组模型选择过大 (40°) 和过小 (30°) 2 个截骨角度模型, 具体信息见图 2-4。

1.4.4 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, 见表 1, 由于强直性脊柱炎后凸患者椎间盘、韧带严重骨化^[10-12], 故采用同松质骨相同的材料参数。对最下端的骶骨进行全约束, 对 C₁ 进行载荷设定, 表面施加预载荷, 计算脊柱内固定和截骨面的应力以及位移, 并与未重建脊柱矢状面平衡模型的内固定和截骨面的应力进行对比。

表 1 | 脊椎、椎间盘及韧带和内固定材料参数

Table 1 | Material parameters of spine, intervertebral disc and ligament

组织	弹性模量 (MPa)	泊松比
皮质骨	12 000	0.30
松质骨	12 000	0.30
椎间盘	12 000	0.30
韧带	12 000	0.30
螺钉	1.034×10 ⁵	0.35
钛棒	1.034×10 ⁵	0.35
钛笼	1.034×10 ⁵	0.35

1.5 主要观察指标 通过有限元分析软件计算 3 种不同截骨模型的总位移、各椎体位移数据, 内固定和截骨接触面的等效应力、最大主应力和最小主应力等数据。

2 结果 Results

2.1 有限元模型的特点 构建完成 3 种 VCR 有限元截骨模型, 其中 VCR30° 模型共划分 10 节点四面体单元 773 381 个, 1 306 765 个节点; VCR32.2° 模型共划分 10 节点四面体单元 91 6045 个, 1 515 115 个节点; VCR40° 模型共划分 10 节点四面体单元 810 169 个, 1 327 407 个节点, 见图 5。

2.2 有限元模型的位移差异 位移差异分析结果如下: 总位

移大小排序: VCR40° > VCR30° > VCR32.2°, 分别为 1.77 mm, 0.64 mm, 0.50 mm, VCR30° 和 VCR32.2° 两者由于截骨角度差异小, 位移差距不显著, VCR40° 和 VCR32.2° 差异显著, 前者是后者的 3.5 倍, 其他 24 个椎体位移与总位移趋势相似, 依然以 VCR40° 模型位移最大, 其他 2 个模型差异依然不显著, 见表 2。其次, 从总位移数据和每个椎体位移数据能够看出, 位移从颈椎开始, 依次递减, C₁ 最大, L₅ 最小, 见图 6。

表 2 | 不同全脊椎截骨 (VCR) 角度的截骨模型位移表

(mm)

Table 2 | Displacement of three kinds of vertebral column resection osteotomy models

椎体位移	VCR30°	VCR32.2°	VCR40°	均值
总位移	0.64	0.50	1.77	0.97
C ₁ 椎体位移	0.62	0.50	1.74	0.95
C ₂ 椎体位移	0.55	0.47	1.69	0.90
C ₃ 椎体位移	0.53	0.46	1.42	0.77
C ₄ 椎体位移	0.52	0.45	1.33	0.76
C ₅ 椎体位移	0.50	0.44	1.29	0.74
C ₆ 椎体位移	0.49	0.42	1.26	0.73
C ₇ 椎体位移	0.48	0.41	1.23	0.72
T ₁ 椎体位移	0.48	0.40	1.23	0.70
T ₂ 椎体位移	0.46	0.39	1.23	0.69
T ₃ 椎体位移	0.43	0.40	1.22	0.68
T ₄ 椎体位移	0.42	0.40	1.22	0.68
T ₅ 椎体位移	0.42	0.39	1.20	0.67
T ₆ 椎体位移	0.41	0.40	1.20	0.67
T ₇ 椎体位移	0.41	0.40	1.18	0.66
T ₈ 椎体位移	0.40	0.40	1.15	0.65
T ₉ 椎体位移	0.40	0.39	1.09	0.62
T ₁₀ 椎体位移	0.39	0.38	1.03	0.60
T ₁₁ 椎体位移	0.37	0.35	0.94	0.55
T ₁₂ 椎体位移	0.33	0.31	0.84	0.49
L ₁ 椎体位移	0.31	0.27	0.72	0.43
L ₂ 椎体位移	0.28	0.22	0.60	0.36
L ₃ 椎体位移	0.25	0.20	0.44	0.29
L ₄ 椎体位移	0.17	0.11	0.32	0.20
L ₅ 椎体位移	0.10	0.07	0.21	0.12

2.3 内固定应力差异 椎弓根螺钉、钛棒、钛笼以及截骨接触面的应力分布趋势: 不论是钉棒应力, 还是钛笼应力, VCR40° 都要高于其他 2 个模型和平均值, 并且差异明显, VCR32.3° 在 3 种模型中应力最小, 也低于平均值, 并且各节段等效应力分布均匀, 没有出现应力集中的现象, 而 VCR40° 模型在 L₁ 和 L₂ 节段螺钉应力出现分布异常, 两者差异 95 MPa, L₂ 是 L₁ 的 11 倍, 这极易导致因应力集中而出现内固定失败, 见表 3, 图 7。

表 3 | 不同全脊椎截骨 (VCR) 模型内固定和截骨接触面等效应力表 (MPa)

Table 3 | Equivalent stress of internal fixation and osteotomy interface of three kinds of vertebral column resection osteotomy models

内固定应力	VCR30°	VCR32.2°	VCR40°	均值
螺钉钉棒应力	53.08	48.20	122.29	74.52
T ₁₂ 固定节段左侧螺钉应力	4.93	4.50	22.64	10.69
L ₁ 固定节段左侧螺钉应力	9.15	8.23	9.17	8.85
L ₂ 固定节段左侧螺钉应力	40.73	36.27	104.23	60.41
L ₄ 固定节段左侧螺钉应力	43.37	27.76	62.73	44.62
L ₅ 固定节段左侧螺钉应力	24.84	20.31	68.68	37.94
S ₁ 固定节段左侧螺钉应力	50.74	39.41	116.60	68.81
钛笼应力	26.29	24.25	65.95	38.83
左侧钛棒应力	51.64	43.26	100.60	64.96
截骨面应力	22.54	11.46	31.87	22.91

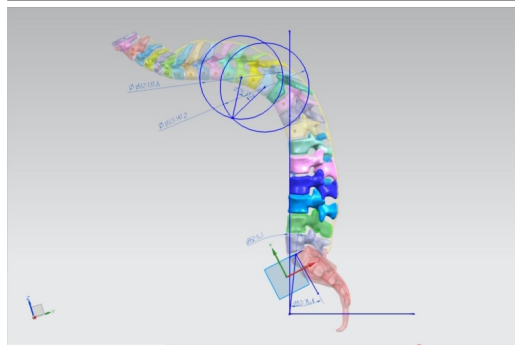
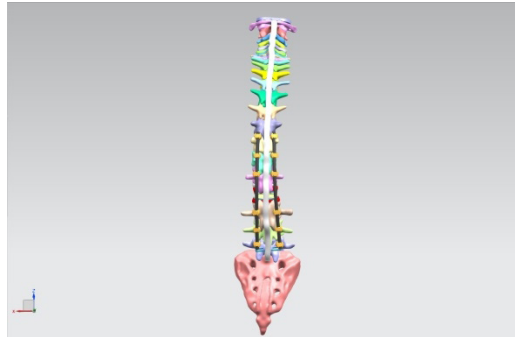


图 1 | 矢状位参数测量图

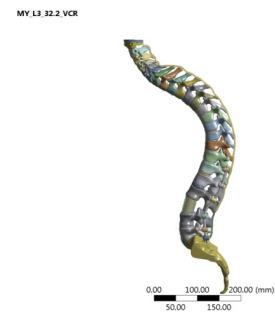
Figure 1 | Pelvic sagittal parameters measurement



图注：图中显示了 6 个固定节段共 12 枚螺钉

图 3 | 内固定置入图 (背侧)

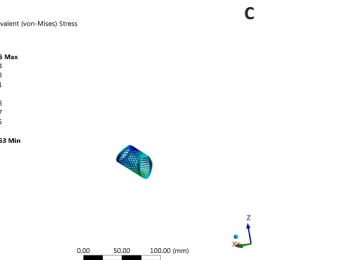
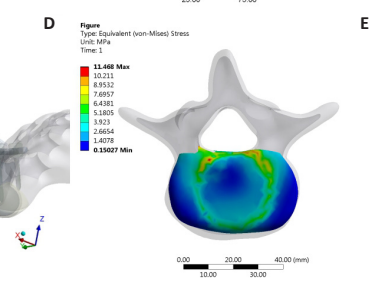
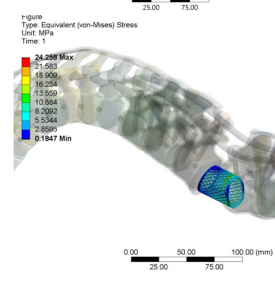
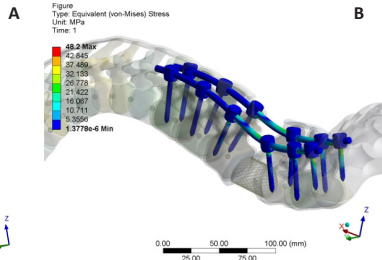
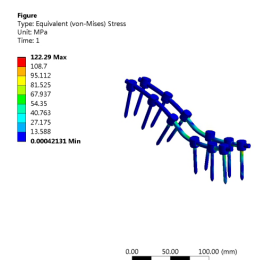
Figure 3 | Internal fixation (dorsal side)



图注：术后脊柱矢状面重心重新恢复在中立位线上

图 5 | 全脊椎截骨术重建脊柱矢状面平衡截骨有限元模型图 (VCR32.2°)

Figure 5 | Model of sagittal balanced osteotomy reconstructed by vertebral column resection (VCR32.2°)



图注：图 A, B 为 VCR40° 和 VCR32.2° 钉棒等效力图，应力均集中于固定节段附近；C, D 为 VCR40° 和 VCR32.2° 钛笼等效力图；E 为 VCR32.2° 截骨接触面等效力图；C-E 应力均集中于钛笼周围

图 7 | 不同全脊椎截骨 (VCR) 角度内固定应力差异图

Figure 7 | Differences in internal fixation stress at different vertebral column resection angles



图注：右至左侧依次为原始模型、截骨角度 30°、截骨角度 32.2°、截骨角度 40°、截骨角度 50° 和截骨角度 60°

图 2 | 不同截骨角度矢状面效果图

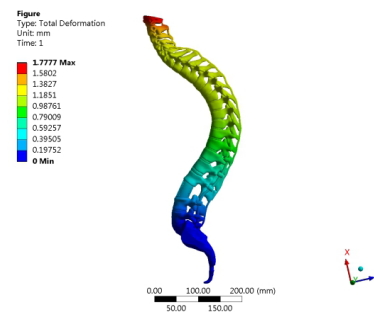
Figure 2 | Sagittal view of different osteotomy angles



图注：左至右依次为 VCR30°, VCR32.2°, VCR40°

图 4 | 全脊椎截骨 (VCR) 角度模型矢状面图

Figure 4 | Sagittal view of three vertebral column resection models



图注：位移大小从 C₁ 至骶尾骨依次递减

图 6 | 全脊椎截骨 (VCR) 角度 VCR40° 总位移图

Figure 6 | Total displacement diagram of vertebral column resection (VCR40°)

3 讨论 Discussion

3.1 脊椎截骨术 目前主流的脊椎截骨术包括 SPO, PSO 和 VCR 等术式, SPO 术是由 Smith-petesen 在 1945 年首次报道, 故该术式以其名字命名, 手术切除范围在 3 种术式中最小, 包含椎板和关节突, 闭合切除后的间隙, 由于手术切除范围仅包含后柱, 故截骨角度有限, 仅能矫正轻度后凸畸形^[13], 若需要矫正较大角度的后凸, 则需要多节段联合截骨^[14]。该手术方式由于未对前中柱进行截骨, 脊髓和神经并发症较少, 并且手术操作简单, 出血和其他并发症的发生率低。PSO 术最早于 1985 年首次报道, 手术切除范围较 SPO 术明显增大, 增加了前中柱, 属于 3 柱截骨, 仅保留前纵韧带, 因此截骨角度比 SPO 显著增加, 目前适用于 40° 以下后凸畸形^[15]。由于 PSO 术截骨范围较大, 术后为维持躯干在矢状位和冠状位平衡, 常出现截骨椎上位椎体或下两位椎体塌陷, 于术后 2 年出现, 表现为局部成角 $> 10^\circ$ 。VCR 术切除范围较前两种术式相比, 范围最大, 包含 1 个或多个节段的椎体、椎弓、椎板、关节突, 以及前纵韧带、后纵韧带、棘间及棘上韧带和黄韧带, 此外还包括上下位的椎间盘, 由于切除范围大, 理论上可以进行 360° 矫形, 尤其适用于矢状面合并冠状面畸形患者。袁磊等^[16] 在一项回顾性研究中发现: 对 68 例中重度胸腰椎角状后凸或侧后凸患者进行后路 VCR 手术治疗, 术后后凸矫正率为 $(64.26 \pm 5.13)\%$, 矫形效果明显。此外, VCR 切除术后间隙需要进行支撑, 以防止脊髓过度短缩和重建术后脊柱稳定性, 目前临床多选择钛笼进行支撑, 钛笼内填充松质骨, 切除上下位椎间盘, 这样后期能够更好地进行骨性融合。

3.2 脊柱矢状面平衡的重建 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, 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, 且随着疾病进展, 出现脊柱强直、关节强直等改变, 导致患者脊柱矢状面失衡。过去手术常追求局部或者整体畸形的矫正, 造成部分患者术后尽管局部畸形明显改善, 但矢状面和冠状面上发生整体失代偿。但是, 随着研究进一步深入, 更多专家学者认为: 外科手术矫形的目的并非恢复至正常的脊柱形态, 而是恢复患者的矢状面平衡, 使患者的重心重新恢复于矢状位骨盆中立线上^[17-18], 过大或者过小的截骨角度都有可能影响矫形术后脊柱的稳定性, 使患者脊柱出现二次失衡, 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^[9] 在脊柱矢状面畸形截骨角度计算方法的研究中指出: 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-髋轴测量法和肺门-髋轴测量法。其中肺门-髋轴测量法更加具备可行性, 该方法的重点在于准确找到肺门的位置, 因此需要有丰富临床经验的放射科医师或者呼吸科医师协助完成。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。

腰椎生理性前凸的重建是影响生物力学的重要因素之一, 由于胸椎椎管容积小, 内容物为脊髓, 不论是置钉或是选择胸椎截骨, 都会面临巨大的风险^[19-21]。此外, 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, 因此, 选择腰椎截骨不仅能够恢复脊柱生理性前凸^[22-23], 还能够降低术中脊髓损伤的风险, 以及减少手术出血、缩短手术时间, 因此选择腰椎为目标截骨更符合临床手术原则。

3.3 有限元分析结果讨论 试验结果提示, 位移差异分析如下: 总位移大小排序 $VCR40^\circ > VCR30^\circ > VCR32.2^\circ$, 分别为 1.77 mm, 0.64 mm 和 0.50 mm, $VCR30^\circ$ 和 $VCR32.2^\circ$ 由于截骨角度差异小, 位移差距不显著, $VCR40^\circ$ 和 $VCR32.2^\circ$ 差异明显, 前者是后者的 3.5 倍, 其他 24 个椎体位移与总位移趋势相似, 依然以 $VCR40^\circ$ 模型位移最大, $VCR30^\circ$ 和 $VCR32.2^\circ$ 模型差异依然不显著。其次, 从总位移数据和每个椎体位移数据能够看出, 位移从颈椎开始, 依次递减, C_1 最大, L_5 最小。椎弓根螺钉、钛棒、钛笼以及截骨接触面的应力分布趋势: 不论是钉棒应力还是钛笼应力, $VCR40^\circ$ 都要高于其他 2 个模型和平均值, 并且差异明显, $VCR32.3^\circ$ 在 3 种模型中应力最小, 也低于平均值, 并且各节段等效应力分布均匀, 没有出现应力集中的现象, 而 $VCR40^\circ$ 模型在 L_1 和 L_2 节段螺钉应力出现分布异常, 两者相差 95 MPa, L_2 是 L_1 的 11 倍, 这极易导致因应力集中而出现内固定失败。从上述分析结果不难看出, $VCR40^\circ$ 由于截骨角度过大导致重心后移, 不论是位移还是内固定应力, 都远高于 $VCR32.2^\circ$; $VCR30^\circ$ 截骨角度不足使患者重心前移, 虽然在位移和内固定应力方面没有 $VCR40^\circ$ 差距显著, 考虑可能是 $VCR30^\circ$ 和 $VCR32.2^\circ$ 角度差异小, 重心前移不明显导致。

3.4 研究局限性 随着越来越多的脊柱外科学者和临床医师对强直性脊柱后凸进行深入研究^[24-25], 手术方案由过去的追求矫形角度到如今的重建脊柱矢状面平衡^[26-28], 手术策略的制定朝科学化、合理化的方向发展^[29-30], 从试验结论也可得出, 重建强直性脊柱后凸患者矢状面平衡能够增加术后脊柱稳定性, 且内固定应力分布更低。试验局限性在于一方面没有纳入脊柱动力位的生物力学研究, 后期进一步研究将纳入脊柱六向运动下的生物力学研究; 另一方面在于样本量过少, 后期将纳入更多不同分型的样本, 并对试验数据进行统计学分析。

作者贡献: 课题设计为谢江和李辉。试验实施为谢江、朱旭和代杰。试验评估为郭惠丽和李辉。资料收集为谢江。

经费支持: 该文章接受了“新疆维吾尔自治区自然科学基金(2020D01C195)”的资助。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, 没有因其岗位角色影响文章观点和对数据结果的报道, 不存在利益冲突。

机构伦理问题: 试验方案经新疆医科大学第六附属医院伦理委员会批准, 批准号: LFYLLSC20191231-03。

知情同意问题: 该受试者对试验内容知晓, 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稿宗旨。

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。

4 参考文献 References

[1] 李青松, 刘少喻, 尹宗生. 多节段腰椎后路椎体间及后外侧融合椎弓根螺钉内固定治疗老年骨质疏松骨折合并胸腰椎后凸畸形 [J]. 中国组织工程研究, 2019,23(4):512-517.

[2] 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.

[3] 海涌, 陈晓明, 吴继功, 等. 后路一期全脊椎截骨术治疗重度僵硬型脊柱侧后凸 [J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2006,16(3):183-186.

[4] 朱泽章, 邱勇. 全脊椎截骨术治疗严重脊柱畸形的若干思考 [J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2016,26(1):19-21.

[5] 陈涛, 黎观保, 梁科友, 等. 脊柱-骨盆矢状面平衡及其在脊柱疾病治疗中的作用 [J]. 中国组织工程研究, 2013,17(13):2423-2430.

[6] 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.

[7] 王琦, 李辉. 颈椎后纵韧带骨化合并椎间融合有限元模型的建立和有效性验证 [J]. 中国组织工程研究, 2020,24(33):20-24.

[8] 曾庆余. 关于强直性脊柱炎的早期诊断 [J]. 中华风湿病学杂志, 2000, 4(2):69-71.

[9] 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.

[10] 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):764-767.

[11] BURSTEIN AH, REILLY DT, MARTENS M. Aging of bone tissue: mechanical properties. *J Bone Joint Surg Am*. 1976;58(1):82-86.

[12] 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.

[13] 陈建良. 老年骨质疏松性陈旧胸腰椎骨折伴后凸畸形后路截骨矫形的术式选择 [J]. 中国骨伤, 2020,33(2):121-126.

[14] 楼宇梁, 全仁夫, 李伟, 等. 多节段与单节段截骨治疗陈旧性胸腰椎骨质疏松性骨折伴后凸畸形的疗效比较 [J]. 中华创伤杂志, 2019, 35(6):513-519.

[15] 刘祖德, 李新锋, 臧危平, 等. 经椎弓根椎体间截骨联合V形截骨术矫正强直性脊柱炎合并重度胸腰椎后凸畸形 [J]. 中华外科杂志, 2009,47(9):681-684.

[16] 袁磊, 刘寅昊, 曾岩, 等. 后路全脊椎截骨矫形术治疗重度胸腰椎角状后凸/侧后凸的中远期效果观察 [J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2020, 30(7):596-603.

[17] 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):63-68.

[18] 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.

[19] 张树文, 徐韬, 盛伟斌. 脊柱矢状面重建术前截骨角度的评估方法及意义 [J]. 中华外科杂志, 2020,58(7):551-554.

[20] 夏三强, 刘盾, 石博, 等. SRS-Schwab IV级截骨术在I型先天性脊柱后凸畸形矫形术中的应用 [J]. 中华骨科杂志, 2019,39(20): 1268-1274.

[21] 蒋彬, 王冰, 吕国华, 等. 腰骶段塌陷型结核后凸畸形后路截骨矫形术后内固定并发症的原因分析 [J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2019, 29(12):8-15.

[22] 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.

[23] 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.

[24] 钱邦平, 邱勇. 强直性脊柱炎颈胸段后凸畸形合并胸腰椎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.

[25] 钱邦平, 邱勇, 潘涛, 等. 经椎弓根不对称截骨重建强直性脊柱炎胸腰椎侧后凸畸形患者双平面平衡 [J]. 中华骨科杂志, 2015,35(4): 341-348.

[26] 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.

[27] CHIN CM, TZENG ST. Pedicle subtraction osteotomy in lateral decubitus position to correct severe kyphosis in patient with ankylosing spondylitis-Case report. *Formosan J Musculoskel Disord*. 2019;10(2): 69-73.

[28] KOU J, GUO J, JI X, et al. A posterior-only approach for ankylosing spondylitis (AS) with thoracolumbar pseudoarthrosis: a clinical retrospective study. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2020;21(1): 370-337

[29] 郑光彬, 洪正华, 陈遥, 等. 保留中柱经椎弓根截骨术治疗陈旧性胸腰段骨折伴后凸畸形的疗效 [J]. 中华创伤杂志, 2020,36(4): 303-308.

[30] 高博, 吴继功, 马华松, 等. 后路三柱截骨矫形术治疗先天性颈胸段脊柱畸形的安全性及并发症分析 [J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2019, 29(7):604-612.

(责任编辑: WJ, ZN, ZH)