

· 临床论著 ·

3D 打印辅助截骨器械矫正强直性脊柱炎后凸畸形

沙西卡·那孜尔汗, 孙治国, 张树文, 王浩*

(新疆维吾尔自治区人民医院, 新疆乌鲁木齐 830000)

摘要: [目的] 评价 3D 打印辅助截骨器械矫正强直性脊柱炎 (ankylosing spondylitis, AS) 后凸畸形的临床效果。[方法] 回顾性分析 2015 年 12 月—2020 年 12 月本院 AS 后凸畸形手术矫正的 47 例患者的临床资料。根据医患沟通结果, 19 例采用 3D 打印辅助手术 (3D 组), 28 例采用常规徒手手术 (常规组)。比较两组围手术期、随访和影像资料。[结果] 两组患者均顺利完成手术, 无死亡、截瘫等严重并发症。3D 组手术时间、切口总长度、术中出血量、术中透视次数、异体输血量、术后 2 d Hb、住院时间均显著优于常规组 ($P<0.05$), 但是, 两组切口愈合等级的差异无统计学意义 ($P>0.05$)。两组患者随访 (27.7 ± 3.3) 个月。3D 组恢复完全负重活动显著早于常规组 ($P<0.05$)。随时间推移, 两组 ADL、VAS、ODI 和 JOA 评分均显著改善 ($P<0.05$)。术后 3 个月和末次随访时, 3D 组的 ADL、VAS、ODI 和 JOA 评分均显著优于常规组 ($P<0.05$)。影像方面, 术后 3D 组置钉准确率显著优于常规组 ($P<0.05$)。与术前相比, 术后 3 个月和末次随访时, 两组矢状面主弯 Cobb 角、矢状面平衡偏移、冠状面主弯 Cobb 角、冠状面平衡偏移均显著改善 ($P<0.05$), 术后 3 个月和末次随访时 3D 组上述影像指标均显著优于常规组 ($P<0.05$)。[结论] 3D 辅助截骨器械矫正 AS 脊柱畸形可显著提高置钉准确率, 减少手术时间、降低手术创伤、改善临床效果。

关键词: 强直性脊柱炎, 后凸畸形, 3D 打印, 截骨术, 器械矫正

中图分类号: R681.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2023) 07-0613-06

3D printing assisted osteotomy and instrumented correction of kyphosis secondary to ankylosing spondylitis // Shaxika Nazirhan, SUN Zhi-guo, ZHANG Shu-wen, WANG Hao. People's Hospital of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830000, China

Abstract: [Objective] To evaluate the clinical outcomes of 3D printing assisted osteotomy and instrumented correction of kyphosis secondary to ankylosing spondylitis (AS). [Methods] A retrospective study was done on 47 patients who received surgical correction of kyphosis secondary to AS kyphosis in our hospital from December 2015 to December 2020. According to the results of doctor-patient communication, 19 patients underwent 3D print-assisted surgery (3D group), and 28 patients underwent conventional freehand surgery (conventional group). The documents regarding to perioperative period, follow-up and radiographs were compared between the two groups. [Results] All patients in both groups had operation finished successfully without death, paraplegia and other serious complications. The 3D group proved significantly superior to the conventional group in terms of operation time, total incision length, intraoperative blood loss, intraoperative fluoroscopy times, amount of allogenic blood transfusion, postoperative hemoglobin (Hb) at 2 days, and hospital stay ($P<0.05$), nevertheless there was no significant difference in incision healing grade between the two groups ($P>0.05$). All of them in both groups were followed up for (27.7 ± 3.3) months, and the 3D group returned to full weight-bearing activity significantly earlier than the conventional group ($P<0.05$). The ADL, VAS, ODI and JOA scores improved significantly over time in both groups ($P<0.05$), which in the 3D group were significantly better than those in the conventional group at 3 months and the latest follow-up ($P<0.05$). Regarding imaging, the accuracy of pedicle screw placement in the 3D group was significantly better than that in the conventional group ($P<0.05$). The Cobb angles of the main curvature and balance deviations in both sagittal and coronal planes significantly improved at 3 months and the last follow-up in both groups compared with those preoperatively ($P<0.05$), which in the 3D group were significantly better than those in the conventional group at 3 months and the latest follow-up ($P<0.05$). [Conclusion] The 3D printing assisted osteotomy and instrumented correction of kyphosis secondary to ankylosing spondylitis do significantly improve the accuracy of screw placement, shorten operation time, reduce surgical trauma and improve clinical outcome.

Key words: ankylosing spondylitis, kyphosis, 3D printing, osteotomy, instrument correction

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2023.07.07

作者简介:沙西卡·那孜尔汗,主治医师,研究方向:脊柱外科,(电话)13579890895,(电子信箱)119338489@qq.com

* 通信作者:王浩,(电话)0991-8562313,(电子信箱)wh1399901326@139.com

强直性脊柱炎 (ankylosing spondylitis, AS) 属于慢性炎症性风湿疾病, 病因还未明确, 和 HLA-B27 具备非常显著的相关性, 以脊柱呈“竹节”改变、侵犯中柱及外周小关节为具体的症状特点。其一般会累及骨盆和脊柱, 多发于青壮年人群, 发病率为 0.1%~4%^[1]。AS 是一种慢性炎症性风湿性疾病^[2], 主要累及小关节, 可能导致脊柱韧带进行性骨化改变, 最终导致僵硬后凸。因为严重后凸患者无法看到地平线-直立时进行计数, 躺下时不能完全仰卧^[3-6]。伴随 3D 打印科技的持续发展, 此项技术在医学方面内运用范围逐渐拓展。因 AS 脊柱后凸矫形的样本个体特殊性、复杂性, 关于术前整体规划手术设计和仿真手术的相关分析较少。故本研究基于计算机仿真 1:1 打印椎体, 并进行术前计划、规划手术操作、截骨范围, 并合理反复推敲手术过程, 按计划进行操作, 为患者手术前进行个体化演练达到提高手术安全及手术操作过程流畅的目的, 从而减少手术时间、减少出血量达到满意的临床效果, 为临床提供新的思路。

1 资料与方法

1.1 纳入与排除标准

纳入标准: (1) 符合 1984 年纽约修订 AS 诊断标准^[6], 经 HLA-B27 检验及影像学检查确诊 (图 1a, 1b); (2) 有显著的临床症状, 如顽固性腰痛, 功能障碍; (3) 保守诊疗 3 个月以上症状无法缓解; (4) 能够运用外科手术方式解决; (5) 手术均由同一骨科医师团队完成, 获得至少 2 年以上的随访。

排除标准: (1) 其他原因造成的畸形如特发性、神经肌肉性、退变性; 排除外伤、肿瘤、感染造成畸形; (2) 伴有严重心肺功能障碍, 不能耐受手术。

1.2 一般资料

回顾性分析 2015 年 12 月—2020 年 12 月收治的 AS 患者, 共 47 例符合以上标准, 纳入本研究。患者均表现僵硬后凸, 严重者无法看到地平线, 躺下时不能完全仰卧。经术前宣教, 患者自主选择分组, 其中, 3D 组 19 例, 常规组 28 例。两组患者术前一般资料见表 1, 两组年龄、性别、体质指数 (body mass index, BMI)、病程和 301 分型^[7]的差异均无统计学意义 ($P>0.05$)。本研究通过医院伦理委员会审核, 所有患者均签订知情同意书。

表 1 两组患者术前一般资料与比较

指标	3D 组 (n=19)	常规组 (n=28)	P 值
年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$)	39.8±12.2	43.5±11.3	0.203
性别 (例, 男/女)	5/14	7/21	0.085
BMI (kg/m^2 , $\bar{x} \pm s$)	19.2±5.3	20.1±6.1	0.108
病程 (月, $\bar{x} \pm s$)	27.8±7.8	26.5±7.3	0.178
301 分型 (例)			
I	3	4	
IIA	5	5	
IIB	3	6	
IIIA	6	5	
IIIB	1	5	
IVA	1	2	
IVB	0	1	

1.3 手术方法

3D 组: 术前行脊柱 640 排 CT 扫描, CT 数据以 Dicom 格式录入 Mimics 19.0, 选择阈值分割和区域增长, 三维重建脊柱模型。个性化确定责任椎, 设计椎弓根减缩截骨术 (pedicle subtraction osteotomy, PSO), 或者椎柱切除 (vertebral column resection, VCR) 截骨, 并制备 3D 打印导板。打印制备实体导板与实体脊柱模型, 验证确认两者高度契合。在 3D 打印实体模型模拟手术 (图 1c), 验证截骨范围、纠正角度、螺钉长度, 同时查看血管毗邻关系。患者气管插管全麻, 折叠手术台腰桥, 并对胸腹部软性凝胶垫支撑, 患者取俯卧位, 保护眼部及其他区域脏器, 尽量避免头颈部受力, 术中全程神经电生理监护。行后纵向切口, 根据术前计划显露脊柱节段, 分别按术前模拟, 辨认确定骨性结构标志, 并确认导板匹配 (图 1d), 依次置入椎弓根螺钉, 安装临时棒稳定脊柱。使用超声骨刀按术前规划进行椎板切除, 或经椎弓根、椎间盘切除前中柱, 或 VCR, 分段取出截骨部分 (图 1e), 避免损伤脊髓。双侧棒交替调整, 同时缓慢调整腰桥, 撤除患者前侧凝胶垫, 逐步达到脊柱畸形矫正。将术前设计大小适当的钛笼植骨后置入前柱, 再通过调整双侧棒, 逐步闭合后侧截骨间隙。更换术前设计预弯的双侧棒, 通过交替调整固定的方式完成固定。充分止血, 并放置引流管, 逐层闭合切口。

常规组: 术前利用影像学检查评估进行手术计划, 选择内固定物与器械。麻醉体位同上, 术中常规徒手进行置钉、截骨、矫正固定等操作。

术日应抗生素预防感染, 术后常规抗凝预防血

栓。术后卧床，鼓励患者主动足泵活动，肌肉等长、长张收缩康复训练。密切观察患者下肢神经功能。术后 72 h 拔除引流管。

1.4 评价指标

记录两组患者的围手术期资料。采用完全负重活动时间、日常活动评分 (activities of daily living, ADL)、疼痛视觉模拟评分法 (visual analogue scale, VAS)^[8]、Oswestry 功能障碍指数 (Oswestry disability index, ODI)^[9] 和日本骨科协会 (Japanese Orthopaedic Association, JOA) 腰椎评分评价临床效果^[10]。影像学检查，采用 Gertzbein-Robbins 标准评价置钉

准确度，计算准确率。测量矢状面与冠状面主弯 Cobb 角，以及矢状面与冠状面平衡偏移。

1.5 统计学方法

采用 SPSS 20.0 软件进行统计学分析。计量数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示，资料呈正态分布时，两组间比较采用独立样本 *t* 检验，组内时间点比较采用单因素方差分析；资料呈非正态分布时，采用秩和检验。计数资料采用 χ^2 检验或 Fisher 精确检验。等级资料两组比较采用 Mann-Whitney *U* 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

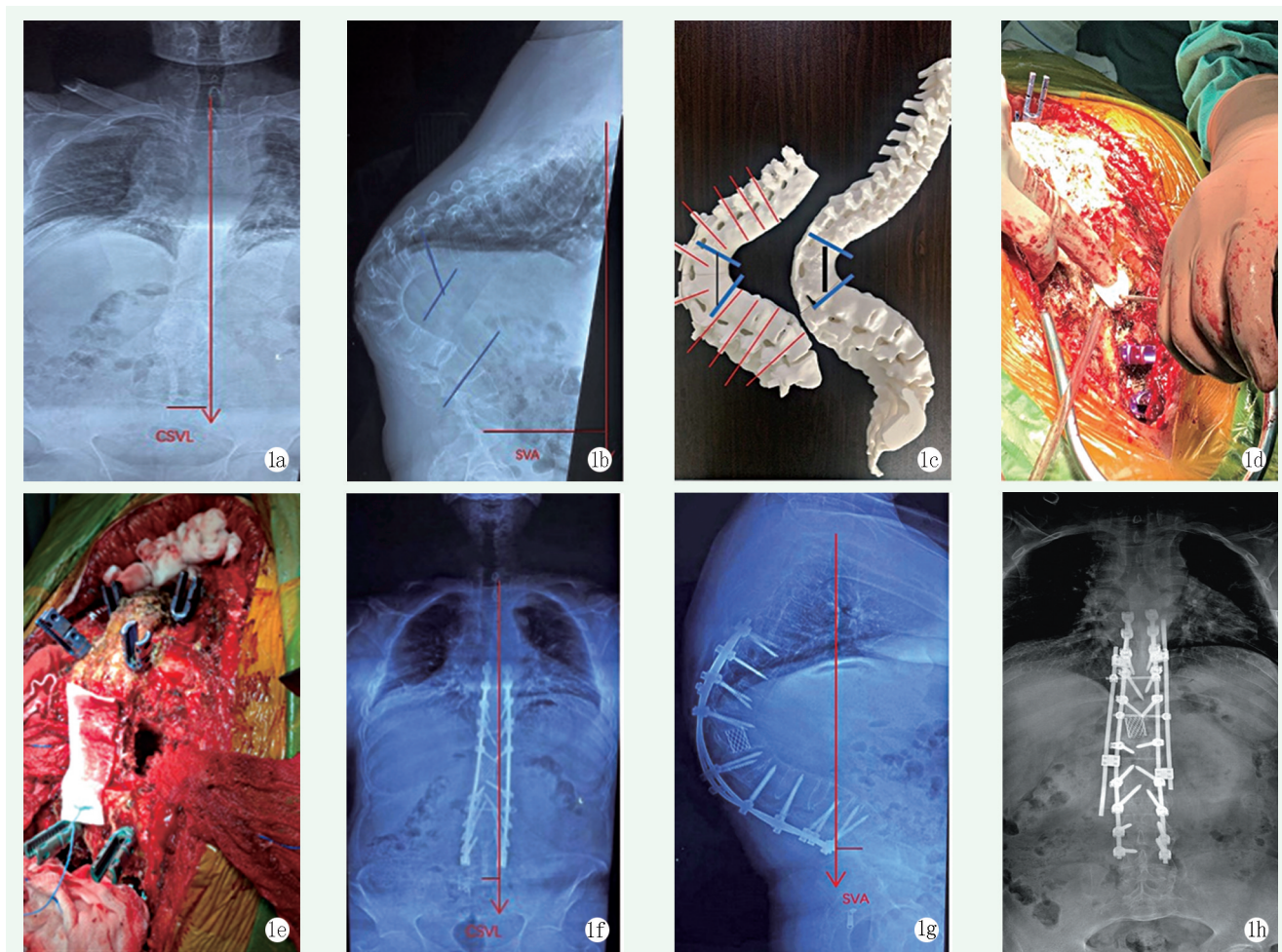


图 1 患者，男，39 岁，3D 组辅助 AS 畸形矫正 1a: 术前正位脊柱全长 X 线片示 AS 合并冠状位失衡 1b: 术前侧位全长 X 线片示 AS 合并脊柱后凸畸形 1c: 术前预先 3D 打印脊柱实体模型，模拟置钉与截骨 (蓝色标记区域) 1d: 术中确认 3D 打印导板脊柱高度契合，予以置钉 1e: 术中依据流程开展 VCR 截骨操作 1f: 术后脊柱全长正位 X 线片示冠状位失衡纠正 1g: 术后全长侧位 X 线片示矢状位失衡纠正 1h: 术后 27 个月椎弓钉位置良好，钛棒断裂，行翻修卫星棒固定后正位 X 线片

2 结果

2.1 围手术期资料

两组患者均顺利完成手术，无死亡、截瘫等严重并发症。两组患者围手术期资料见表 1。3D 组手术

时间、切口总长度、术中出血量、术中透视次数、异体输血量、术后 2 d 血红蛋白 (hemoglobin, Hb)、住院时间均显著优于常规组 ($P < 0.05$)，但是，两组切口愈合等级的差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。3D 组出现皮下脂肪液化 1 例，切口积血 1 例；常规组皮下积液 1 例、切口积血 2 例；经加强换药等处理，切口均

愈合, 无严重不良后果。两组患者住院期间均未发生症状性下肢血栓, 无严重院内感染。

表 2 两组患者围手术期资料与比较

指标	3D 组 (n=19)	常规组 (n=28)	P 值
手术时间 (min, $\bar{x} \pm s$)	115.3±10.4	158.1±28.7	<0.001
切口总长度 (cm, $\bar{x} \pm s$)	21.1±3.5	26.6±4.7	<0.001
术中出血量 (ml, $\bar{x} \pm s$)	470.8±30.4	648.5±15.9	<0.001
术中透视次数 (次, $\bar{x} \pm s$)	7.8±1.2	11.5±2.5	<0.001
异体输血量 (ml, $\bar{x} \pm s$)	188.5±26.8	525.2±54.7	<0.001
术后 2 d Hb (g/L, $\bar{x} \pm s$)	102.2±11.6	87.7±10.0	<0.001
切口愈合等级 (例, 甲/乙/丙)	17/2/0	25/3/0	0.641
住院时间 (d, $\bar{x} \pm s$)	11.8±0.6	17.1±0.6	<0.001

2.2 随访结果

两组患者均获随访, 随访时间 22~32 个月, 平

均 (27.7±3.3) 个月。随访过程中, 3D 组 1 例患者于术后 27 个月内固定棒断裂, 但椎弓根钉稳定, 翻修卫星棒加强固定 (图 1h)。常规组出现 1 例近侧结合部后凸 (proximal junctional kyphosis, PJK) 1 例, 伴神经症状, 影像表现椎弓钉松动, 予以翻修手术, 采用多米诺连接格杆延长固定; 1 例远侧结合部后凸 (distal junctional kyphosis, DJK), 无神经症状, 其骶髂关节已融合, 稳定性较好, 故选择保守。

两组患者随访资料见表 3, 3D 组恢复完全负重活动时间显著早于常规组 ($P<0.05$)。随时间推移, 两组 ADL、VAS、ODI 和 JOA 评分均显著改善 ($P<0.05$)。术前两组间 ADL、VAS、ODI 和 JOA 评分的差异均无统计意义 ($P>0.05$), 术后 3 个月和末次随访时, 3D 组的 ADL、VAS、ODI 和 JOA 评分均显著优于常规组 ($P<0.05$)。

表 3 两组患者随访结果 ($\bar{x} \pm s$) 与比较

指标	时间点	3D 组 (n=19)	常规组 (n=28)	P 值
完全负重活动时间 (周)		23.8±4.3	31.2±5.7	<0.001
ADL 评分 (分)	术前	32.4±7.7	37.4±8.3	0.681
	术后 3 个月	65.5±6.7	52.3±7.5	<0.001
	末次随访	81.3±6.6	71.5±6.3	<0.001
	P 值	<0.001	<0.001	
VAS 评分 (分)	术前	6.1±1.8	6.3±2.3	0.242
	术后 3 个月	2.8±1.9	4.2±1.2	<0.001
	末次随访	1.8±1.0	3.2±1.0	<0.001
	P 值	<0.001	<0.001	
ODI 评分 (%)	术前	52.5±5.2	50.2±4.7	0.341
	术后 3 个月	27.9±5.3	37.2±4.9	<0.001
	末次随访	25.4±3.7	29.4±4.1	<0.001
	P 值	<0.001	<0.001	
JOA 评分 (分)	术前	13.7±5.0	14.8±4.3	0.183
	术后 3 个月	24.8±3.3	19.5±4.5	<0.001
	末次随访	27.8±2.5	22.0±2.7	<0.001
	P 值	<0.001	<0.001	

2.3 影像评估

两组患者影像测量结果见表 4, 术后 3D 组置钉准确率显著优于常规组 ($P<0.05$)。与术前相比, 术后 3 个月和末次随访时, 两组矢状面主弯 Cobb 角、矢状面平衡偏移、冠状面主弯 Cobb 角、冠状面平衡偏移均显著改善 ($P<0.05$)。术前两组间上述影像测量指标的差异均无统计学意义 ($P>0.05$), 术后 3 个月和末次随访时 3D 组均显著优于常规组 ($P<0.05$)。

3 讨论

手术设计涉及截骨节段范围及方案^[11]。解放军总医院提出 301 AS 分型^[7], 系统对差异化类型的手术设计多个角度的因素提供依据, 通过外科手术干预 AS 矢状位失衡能够提高患者生活质量^[12]。外科矫形的方式有 SPO、PSO、VCR 截骨方式, 方式选择根据术者掌握情况, 无统一论^[13, 14]。徒手置钉技术结

合影像、术者经验，常常出现位置不佳、损伤神经的情况出现^[15, 16]。同时在徒手置钉的过程中，翻修错误螺钉位置将增大手术难度且造成内固定不稳定^[17, 18]。部分研究人员使用 3D 导板技术明显增加置钉率。术前术者模拟手术发现手术缺陷，改进个性化方案，提高手术效率并避免并发症发生^[21]，同时手术中使用导板区域使用需要暴露贴附区，增加精确性^[19, 20]。本研究 3D 辅助可个性化提高置钉率准确率，但 CT 扫描是在患者仰卧位完成，与术中俯卧位非常显著的区别，因此，术中要注意骨性解剖标志的显露，以保证导板与脊柱的准确匹配^[21]。常规徒手置钉根据术者经验、手感及二维影像学片置钉，并且

骨性融合造成骨性标志缺失、异常增生、椎弓根缺失等问题造成置钉失败、反复翻修、内固定稳定性降低。本研究与 Liu 等^[24]研究一致，术前模拟手术有利于实际手术提高置钉率；但丰富的手术经验依然是手术成功的关键，如操作偏差可徒手置钉补救。Yu 等^[23]纳入 446 例患者和 3 375 枚螺钉的 13 项研究结果表明，通过 3D 导板可降低操作误差、提高置钉率。本研究 3D 组中 1 例 BMI 值偏高患者出现钛棒断裂、但椎弓根钉稳定，无退钉、松动，予以翻修卫星棒加固，根据术者经验，BMI 偏高患者必要时予以卫星棒加固。

表 4 两组患者影像评估结果 ($\bar{x} \pm s$) 与比较

指标	时间点	3D 组 (n=19)	常规组 (n=28)	P 值
置钉准确率 (%)		85.1±2.7	73.0±3.7	<0.001
矢状面 Cobb 角 (°)	术前	44.7±10.9	49.3±11.1	0.173
	术后 3 个月	14.1±7.4	20.6±5.4	<0.001
	末次随访	15.5±4.6	21.1±8.9	<0.001
	P 值	<0.001	<0.001	
矢状位 SAV (cm)	术前	47.4±11.9	45.4±13.5	0.192
	术后 3 个月	18.1±6.4	25.1±5.8	<0.001
	末次随访	17.9±5.4	24.1±4.4	<0.001
	P 值	<0.001	<0.001	
冠状面 Cobb 角 (°)	术前	10.4±2.9	9.3±3.1	0.189
	术后 3 个月	5.1±1.4	6.4±1.9	<0.001
	末次随访	4.5±0.6	5.6±1.7	<0.001
	P 值	<0.001	<0.001	
冠状面 C7-CSVL (cm)	术前	4.4±0.9	5.3±1.2	0.171
	术后 3 个月	2.1±0.2	2.4±0.8	<0.001
	末次随访	1.4±0.6	1.6±0.7	<0.001
	P 值	<0.001	<0.001	

王岩提出松质骨截骨术矫正 AS 合并后凸畸形^[25]，运用了扩大蛋壳技术，其去除预截骨椎体后方多个棘突，依据“Y”字形截骨，经椎弓根截骨闭合骨面利于融合、优势在于缩小截骨范围、减少神经功能损害，选取以马尾神经即 L₁ 水平以下为主、避免严重神经功能损害，本研究在术前计划使用骨盆入射角预估骨盆位置性参数骨盆倾斜角并记录骨盆中立位线，以截骨椎体前缘旋转中心，将躯干重心标记(肺门)重置在骨盆中立位线上进行截骨设计，保证骨盆中立位达到矢状面平衡重建的手术目的，对于复杂后凸矢状位平衡仍需个性化选择 VCR 截骨，VCR 截骨往往易造成严重神经并发症，所以根据术者经验

术中肌电监护尤为重要，同时对于矫形的目的不只是影像学上的绝对的矫形，仍以改善生活状态为主要手术目的，需在术中积累经验，在运动、感觉波幅下降幅度中选择矫形角度，与术前矫形预演矫形存在差别，但脊髓神经功能的非常重要，矫形加临时棒支撑矫形时，术中监测运动波幅明显下降，需立刻停止矫形，避免“矫枉过正”损伤脊髓，保留部分后凸角度有利于避免神经功能丧失，故术中矫形角度需低于预演设计矫形角度，神经功能的保留原比争取部分矫形角度要重要。

综上所述，AS 使用术前 3D 辅助个性化模拟截骨器械矫形能够按预定计划完成手术，具有显著提高

置钉率, 并达到术前要求, 减少手术时间、降低手术创伤、有效避免并发症的优势。同时使用3D导航技术的应用与本课题组曾研究颈胸段结核畸形矫形术后都取得满意的效果^[26]。本研究的局限性在于样本量不足, 病例具备一定的个体差异, 需要尽可能探寻一个科学、统一、完善的AS诊疗方案。

参考文献

[1] Mohammadi H, Hemmatzadeh M, Babaie F, et al. MicroRNA implications in the etiopathogenesis of ankylosing spondylitis [J]. *Cell Physiol*, 2018, 233 (8): 5564-5573.

[2] Braun J, Sieper J. Ankylosing spondylitis [J]. *Lancet*, 2007, 369: 1379-1390.

[3] Vander Cruyssen B, Muñoz-Gomariz E, Font P, et al. Hip involvement in ankylosing spondylitis: epidemiology and risk factors associated with hip replacement surgery [J]. *Rheumatology (Oxford)*, 2010, 49 (1): 73-81.

[4] Koller H, Meier O, Zenner J, et al. Non-instrumented correction of cervicothoracic kyphosis in ankylosing spondylitis: a critical analysis on the results of open-wedge osteotomy C₇-T₁ with gradual Halo-Thoracic-Cast based correction [J]. *Eur Spine J*, 2013, 22 (4): 819-832.

[5] Tan LA, Riew KD. Anterior cervical osteotomy: operative technique [J]. *Eur Spine J*, 2018, 27 (1): 39-47.

[6] Burki V, Gossec L, Payet J, et al. Prevalence and characteristics of hip involvement in spondyloarthritis: a single-centre observational study of 275 patients [J]. *Clin Exp Rheumatol*, 2012, 30 (4): 481-486.

[7] 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.

[8] Wewers ME, Lowe NK. A critical review of visual analogue scales in the measurement of clinical phenomena [J]. *Res Nurs Health*, 1990, 13 (4): 227-326.

[9] Fairbank JC, Pynsent PB. The Oswestry disability index [J]. *Spine*, 2000, 25 (22): 2940-2952.

[10] 郑杰, 何敏娟, 王大伟, 等. 退变性脊柱侧弯3D打印个性化减压融合 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2021, 29 (15): 1364-1368.

[11] Van der Linden S, Valkenburg HA, Cats A. Evaluation of diagnostic criteria for ankylosing spondylitis. A proposal for modification of the New York criteria [J]. *Arthritis Rheum*, 1984, 27 (4): 361-368.

[12] Arun R, Dabke HV, Mehdian H. Comparison of three types of lumbar osteotomy for ankylosing spondylitis: a case series and evolution of a safe technique for instrumented reduction [J]. *Eur Spine J*, 2011, 20 (12): 2252-2260.

[13] Pasha S, Flynn J. Data-driven classification of the 3D spinal curve

in adolescent idiopathic scoliosis with an applications in surgical outcome prediction [J]. *Sci Rep*, 2018, 8 (1): 16296.

[14] Bohl MA, Zhou JJ, Mooney MA, et al. The Barrow Biomimetic Spine: effect of a 3-dimensional-printed spinal osteotomy model on performance of spinal osteotomies by medical students and interns [J]. *J Spine Surg*, 2019, 5 (1): 58.

[15] Gadiya A, Shah K, Nagad P, et al. A technical note on making patient-specific pedicle screw templates for revision pediatric kyphoscoliosis surgery with sublaminar wires in situ [J]. *J Orthop Case Rep*, 2019, 9 (1): 82.

[16] Clifton W, Vlasak A, Damon A, et al. Freehand C₂ pedicle screw placement: surgical anatomy and operative technique [J]. *World Neurosurg*, 2019, 132: 113.

[17] Takahata M, Yamada K, Akira I, et al. A novel technique of cervical pedicle screw placement with a pilot screw under the guidance of intraoperative 3D imaging from C-arm cone-beam CT without navigation for safe and accurate insertion [J]. *Eur Spine J*, 2018, 27 (11): 2754-2762.

[18] Zhao Z, Liu Z, Hu Z, et al. Improved accuracy of screw implantation could decrease the incidence of post-operative hydrothorax? O-arm navigation vs. free-hand in thoracic spinal deformity correction surgery [J]. *Int Orthop*, 2018, 42 (9): 2141-2146.

[19] 黄旭科, 李鹏, 孙向华, 等. 数字设计与3D打印辅助手术治疗髋臼骨折 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2019, 27 (13): 1225-1229.

[20] 赵永辉, 马宇龙, 罗浩天, 等. 3D打印手术导板辅助强直性脊柱炎截骨矫形 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2020, 28 (24): 2276-2280.

[21] 江辉, 梅伟, 王祥善, 等. 强直性脊柱炎截骨矫正3D打印导板辅助椎弓钉置入 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2020, 30 (6): 508-512.

[22] Gupta MC, Gupta S, Kelly MP, et al. Pedicle subtraction osteotomy [J]. *JBJS Essent Surg Tech*, 2020, 10 (1): e0028.1-11.

[23] Yu C, Ou Y, Xie C, et al. Pedicle screw placement in spinal neurosurgery using a 3D-printed drill guide template: a systematic review and meta-analysis [J]. *J Orthop Surg Res*, 2020, 15 (1): 1.

[24] Liu J, Kang N, Zhang Y, et al. Systemic changes associated with quality of life after surgical treatment of kyphotic deformity in patients with ankylosing spondylitis: a systematic review [J]. *Eur Spine J*, 2020, 29 (4): 794-802.

[25] 刘新宇, 原所茂, 田永昊, 等. 扩大“蛋壳”结合闭合-张开技术治疗胸腰椎角状后凸畸形 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2014, 24 (9): 779-783.

[26] 沙西卡·那孜尔汗, 孙治国, 王浩, 等. 3D打印导板导航技术在二期后路治疗颈胸段结核伴后凸畸形的疗效分析 [J]. *中华医学杂志*, 2017, 97 (43): 3421-3426.

(收稿:2021-11-10 修回:2022-06-06)
(同行评议专家:李永津 苏国义)
(本文编辑:郭秀婷)