

椎弓根置钉导向器在重度脊柱畸形患者 矫形手术中的应用

王文刚¹, 夏磊¹, 罗明¹, 张华峰¹, 李明君², 杨宁宁¹, 申明奎¹, 许根中¹, 刘磊¹

(1 郑州大学第一附属医院骨科; 2 肿瘤科 450052 郑州市)

【摘要】目的:探究 3D 打印的个性化椎弓根置钉导向器对于重度脊柱畸形患者(主弯 Cobb 角 $\geq 90^\circ$)矫形手术中辅助置钉的安全性和有效性。**方法:**回顾我院 2017 年 1 月~2017 年 9 月采用椎弓根置钉导向器辅助置钉的 13 例(9 女 4 男)重度脊柱畸形患者,平均手术年龄 12.9 ± 3.1 岁(10~19 岁),随访时间 13.8 ± 1.9 个月(12~18 个月)。术后 2 周 CT 测量椎弓根螺钉突破椎弓根皮质的程度,并将其分成 0 级(未突破椎弓根皮质)、1 级(突破 $< 2\text{mm}$)、2 级(突破 $2 \sim 4\text{mm}$)、3 级(突破 $> 4\text{mm}$),其中 0 级和 1 级认定为螺钉置入准确。测量并比较术前、术后 2 周、末次随访的主弯 Cobb 角、后凸角、冠状面平衡、脊柱矢状位轴,记录置钉相关并发症。**结果:**13 例重度脊柱畸形患者术中在 119 枚椎弓根置钉导向器(238 个椎弓根导向孔)的辅助下,成功置入 232 枚椎弓根螺钉,辅助置钉成功率 97.5%(232/238)。依据 CT 测量分级,0 级、1 级、2 级和 3 级螺钉数依次为 111 枚、84 枚、33 枚和 4 枚,置钉准确率为 84.1%(195/232)。术后 2 周,主弯 Cobb 角由术前的 $110.6^\circ \pm 15.2^\circ$ 纠正至 $52.3^\circ \pm 16.2^\circ$ ($P < 0.05$);后凸角由术前的 $58.3^\circ \pm 20.6^\circ$ 纠正至 $35.7^\circ \pm 10.4^\circ$ ($P < 0.05$);冠状面平衡由术前的 $2.8 \pm 1.7\text{cm}$ 纠正至 $1.7 \pm 0.5\text{cm}$ ($P < 0.05$);脊柱矢状位轴由术前的 $3.1 \pm 1.8\text{cm}$ 纠正至 $1.4 \pm 0.4\text{cm}$ ($P < 0.05$)。末次随访与术后 2 周比较,无统计学差异($P > 0.05$)。至末次随访时,未发生严重的置钉相关并发症。**结论:**椎弓根置钉导向器可为重度脊柱畸形患者提供准确性较高的辅助导航。

【关键词】椎弓根置钉导向器;重度脊柱畸形;椎弓根置钉;置钉准确性

doi:10.3969/j.issn.1004-406X.2019.05.04

中图分类号:R687.3 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2019)-05-0407-07

Application of pedicle screwing guider to severe spinal deformity/WANG Wengang, XIA Lei, LUO Ming, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2019, 29(5): 407-413

【Abstract】 Objectives: To explore the safety of 3D printed personalized pedicle screwing guiders for assisting screw placement during the operation of severe spinal deformity (Cobb angle of major curve $\geq 90^\circ$). **Methods:** Thirteen patients(9 females and 4 males) with severe spinal deformities who were treated with pedicle screwing guider technology from January 2017 to September 2017 in our hospital were retrospectively analyzed. Mean age at the time of surgery was 12.9 ± 3.1 years, ranged from 10 to 19 years. Mean follow-up time was 13.8 ± 1.9 months, ranged from 12 to 18 months. The placement of pedicle screws was evaluated by CT scans two weeks after surgery. According to the degree of pedicle screw breakthrough in the pedicle cortex, pedicle screw placement was divided into grade 0 (no breach), 1 (breach of $< 2\text{mm}$), 2 (breach of $2 \sim 4\text{mm}$) and 3 (breach $> 4\text{mm}$), of which grade 0 and grade 1 were determined to be accurate. The preoperative and postoperative radiograph parameters including Cobb angle of major curve, kyphosis, coronal balance and sagittal vertebral axis were also measured and compared. Screw-related complications were recorded. **Results:** Assisted by 119 pedicle screwing guiders(238 pedicle guide holes), 232 pedicle screws were inserted successfully for the 13 patients with severe spinal deformity, and the success rate of assisted screw placement was 97.5%(232/238). According to the CT classification, the number of grade 0, 1, 2 and 3 was 111, 84, 33 and 4, and the accuracy rate of pedicle screw fixation was 84.1%(195/232). Two weeks after surgery, the Cobb

基金项目:河南省科技攻关项目(编号:172102310090)

第一作者简介:男(1980-),主治医师,医学博士,研究方向:脊柱畸形

电话:(0371)67967191 E-mail:wwg1532@163.com

通讯作者:夏磊 E-mail:xialei_spine@163.com

angle of major curve was corrected from $110.6^{\circ} \pm 15.2^{\circ}$ to $52.3^{\circ} \pm 16.2^{\circ}$ ($P < 0.05$), and kyphosis was corrected from $58.3^{\circ} \pm 20.6^{\circ}$ to $35.7^{\circ} \pm 10.4^{\circ}$ ($P < 0.05$), coronal balance was corrected from 2.8 ± 1.7 cm to 1.7 ± 0.5 cm ($P < 0.05$), and sagittal vertebral axis was corrected from 3.1 ± 1.8 cm to 1.4 ± 0.4 cm ($P < 0.05$). No serious screw-related complication occurred. **Conclusions:** The pedicle screwing guider technology provides individualized navigation for patients with severe spinal deformity, which can achieve high accuracy of screw placement.

【Key words】 Pedicle screwing guider; Severe spinal deformity; Pedicle screw placement; Accuracy rate of screw placement

【Author's address】 Department of Orthopaedic Surgery, the First Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou, 450052, China

重度脊柱畸形是指主弯 Cobb 角超过 90° 的脊柱畸形,常见于先天性脊柱侧凸、特发性脊柱侧凸和综合征性脊柱侧凸^[1,2]。后路椎弓根螺钉系统作为脊柱矫形手术的主流方式,其有效性和安全性已经得到了充分的认可^[3]。重度脊柱畸形常伴椎弓根发育异常,椎体严重旋转,给椎弓根螺钉的置入带来了极大的挑战^[4]。椎弓根螺钉位置不当可能造成神经血管损伤,给患者带来灾难性的后果^[5]。为了有效解决重度脊柱畸形术中椎弓根螺钉置入的难题,我们尝试采用 3D 打印技术设计出个性化的椎弓根置钉导向器,以实现术中精确辅助置钉,在 2017 年 1 月~2017 年 9 月期间共治疗重度脊柱畸形患者 13 例,取得了良好的临床效果,报道如下。

1 资料与方法

1.1 患者纳入和术前准备

本研究通过我院伦理委员会审批后开始纳入研究对象。纳入标准:(1)年龄 10~20 岁;(2)脊柱畸形;(3)主弯 Cobb 角 $\geq 90^{\circ}$;(4)心、肺功能等检查能够耐受脊柱矫形手术;(5)无神经精神类或交流障碍的疾病;(6)监护人或患者知晓椎弓根置钉导向器及可能风险,签署知情同意书。排除标准:(1)存在每分钟最大通气量低于预计值的 30%、近期行心脏大手术、中重度贫血、背部皮肤破溃、全身感染未控制等手术禁忌证;(2)既往有过脊柱内固定手术史;(3)无法配合手术治疗。

本研究共纳入 13 例重度脊柱畸形患者,其中女性 9 例,男性 4 例,平均手术年龄 12.9 ± 3.1 岁(10~19 岁)。随访时间 13.8 ± 1.9 个月(12~18 个月)。其中 10 例为先天性脊柱侧凸,2 例为青少年特发性脊柱侧凸,1 例为 1 型神经纤维瘤病性脊柱侧凸。患者术前身高、体重、身体质量指数(body mass index, BMI)等一般资料见表 1。

患者术前完善全脊柱正侧位及 Bending 位 X 线片、仰卧位下行全脊柱 CT 和 MRI 检查,明确有无脊髓纵裂、小脑扁桃体疝、脊髓空洞和脊髓拴系等异常。

1.2 制作三维脊柱模型和椎弓根置钉导向器

从医院 PACS 工作站将患者的全脊柱 CT 扫描图像以 Dicom 格式下载,并导入 Mimics 14.0 软件(Materialise 公司,比利时),重建三维数字化的脊柱模型。依据术前讨论明确的脊柱固定融合节段设计椎弓根置钉导向器。选择拟置钉的椎体并用特殊颜色显示,在透明视图模式下调整虚拟的中空钉道杆,使得钉道杆尽可能的不突破椎弓根内壁。以椎板、棘突以及横突内侧缘为基板,钉道杆为中心设计支撑面,支撑面与局部骨面成凹凸状贴合。同一椎体的两个椎弓根钉道杆之间用连接杆连接。最终得到由中空钉道杆、支撑面、连接杆三部分构成椎弓根置钉导向器。在导向器上

表 1 纳入对象的基线参数

Table 1 The baseline parameters of the included patients

项目 Category	参数 Parameters
病因类型 Etiology	
先天性脊柱侧凸(例) Congenital scoliosis	10
青少年特发性脊柱侧凸(例) Adolescent idiopathic scoliosis	2
1 型神经纤维瘤病性脊柱侧凸(例) Neurofibromatosis type 1 scoliosis	1
性别(女/男) Sex(female/male)	9/4
年龄(岁) Age	12.9 ± 3.1
身高(cm) Height	153.8 ± 13.1
体重(kg) Weight	50.3 ± 10.5
身体质量指数(kg/m ²) Body mass index	21.2 ± 1.6

标注对应椎体,并以 STL 格式文件导出,采用聚乳酸材料利用 3D 打印机制作出 1:1 比例的椎弓根置钉导向器和三维脊柱模型。3D 打印设备采用 MakerBot Replicator 2 打印机(MakerBot 公司,美国)。将打印出的椎弓根置钉导向器逐一与 3D 脊柱模型对应的椎体进行试装(图 1)。椎弓根置钉导向器采用伽马射线灭菌后备用。

1.3 术中椎弓根置钉导向器辅助置钉

患者全麻后取俯卧位,常规消毒铺巾,取正中切口。小心分离椎旁肌,取椎板和上下关节突,将椎弓根置钉导向器与对应椎体的椎板紧密贴合(图 2)。沿椎弓根置钉导向器的导向孔钻入 2.0mm 克氏针,克氏针进针点和进针角度即为椎弓根螺钉的进钉点和进钉角度。置入长短合适的椎弓根螺钉,并用 C 型臂 X 线机透视确认置钉位置。螺钉置入完成后,截取凹侧和凸侧长短合适的

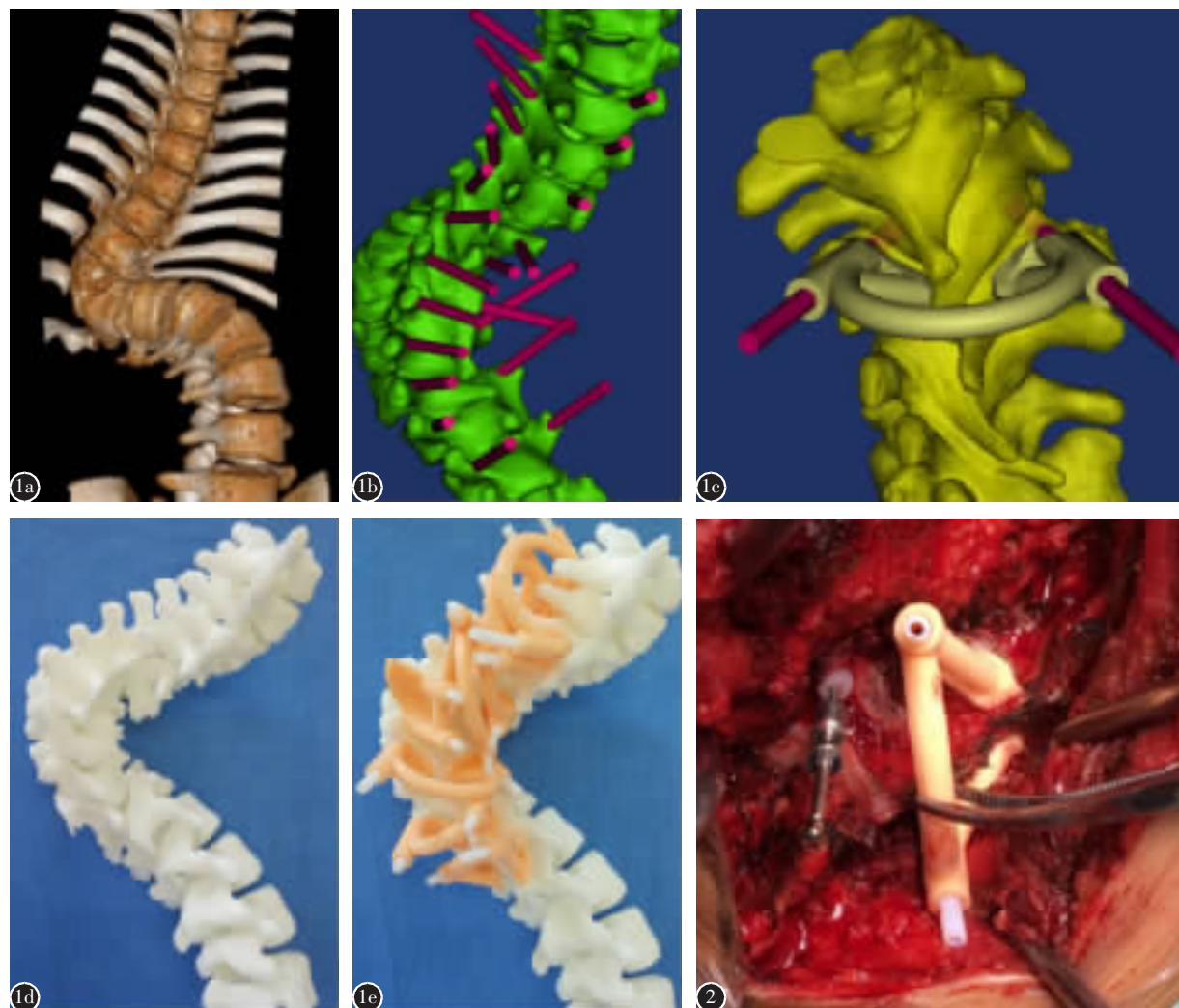


图 1 椎弓根置钉导向器技术流程图 a 重度脊柱畸形患者的术前 CT 三维重建 b 根据 Mimics 软件重建脊柱模型并设计的钉道杆 c 设计完成的单个椎弓根置钉导向器 d 按 1:1 比例 3D 打印脊柱畸形模型 e 椎弓根置钉导向器和脊柱模型试装 图 2 术中显露椎板和上下关节突,将椎弓根置钉导向器与对应椎体的椎板紧密贴合,导向孔指明了椎弓根螺钉的进钉点和进钉角度

Figure 1 Flow diagram of pedicle screwing guider technique **a** Preoperative CT 3D reconstruction of severe spinal deformity **b** Reconstructed 3D spinal model using Mimics and designed the trajectory of screw insertion **c** One designed single pedicle screwing guider **d** 3D printed spinal model at 1:1 ratio **e** Fitting of pedicle screwing guider to spinal model **Figure 2** During the operation, the vertebral plate and the superior and inferior articular processes were exposed, and the pedicle screwing guider was closely attached to the lamina of the corresponding vertebral body, the guiding hole determined the entry point and angle of the pedicle screw

钛棒预弯并临时固定。所有患者均采用 Smith-Petersen 截骨 (Smith-Petersen osteotomy, SPO), 其中 3 例联合经椎弓根椎体截骨 (pedicle subtraction osteotomy, PSO), 1 例重度侧后凸患者联合全椎体切除术 (vertebral column resection, VCR)。采用单纯旋棒技术矫正脊柱畸形, 完成凹侧撑开和凸侧加压操作后锁紧螺钉。将修剪好的自体骨和同种异体骨混合后于固定节段作椎板间和横突间植骨。切口涂洒万古霉素, 留置引流管, 清点器械无误后逐层缝合手术切口。所有手术均由同一脊柱外科医生主刀完成。术后返回病房, 严密监测生命体征和双下肢运动、感觉功能, 常规予以抗生素预防感染、止痛治疗。24h 引流量低于 50ml

予以拔除, 佩戴支具下床活动。术后 7~10d 切口愈合良好予以拆线。典型病例见图 3。

1.4 影像学评估和并发症

所有患者术后 2 周复查 CT 评估椎弓根螺钉置入准确率。依据 CT 横断面椎弓根皮与置入螺钉的关系将椎弓根螺钉准确度分为 4 个等级: 0 级, 椎弓根螺钉未突破椎弓根皮质; 1 级, 椎弓根螺钉突破椎弓根皮质小于 2mm; 2 级, 椎弓根螺钉突破椎弓根皮质 2~4mm; 3 级, 椎弓根螺钉突破椎弓根皮质超过 4mm。本研究将 0 级和 1 级认定为置钉准确; 2 级和 3 级认定为椎弓根螺钉位置不当。螺钉置钉准确率即为 0 级和 1 级的螺钉数占置入螺钉总数的百分比。通过全脊柱正侧位 X 线



图 3 女性患儿, 13 岁, 先天性脊柱侧凸 a 术前全脊柱正位 X 线片示主弯 Cobb 角 133° b 术前全脊柱侧位 X 线片示后凸角 84° c 术后 2 周全脊柱正位 X 线片示主弯 Cobb 角纠正至 62° d 术后 2 周全脊柱侧位 X 线片示后凸角 58° e 末次随访全脊柱正位 X 线片示主弯 Cobb 角为 65° f 末次随访全脊柱侧位 X 线片示后凸角 61°

Figure 3 Typical cases of a 13-year-old female congenital scoliosis patient a Major curve of preoperation was 133° b Pre-op kyphosis was 84° c Major curve of 2 weeks postoperation was 62° d 2 weeks post-op Kyphosis was 58° e Major curve at the last follow-up was 65° f Kyphosis at the last follow-up was 61°

片测量主弯 Cobb 角、后凸角、冠状面平衡(C7 椎体中心到骶骨中垂线的距离)、脊柱矢状位轴(C7 椎体中心到骶骨后上角垂线距离)。

1.5 统计学分析

统计学分析采用 SPSS 21.0 软件(IBM 公司, 美国)。比较患者术前和术后 2 周、术后 2 周和末次随访的主弯 Cobb 角、后凸角、冠状面平衡和脊柱矢状位轴,因其均不符合正态分布,故采用秩和检验。 $P<0.05$ 为具有统计学差异。

2 结果

2.1 影像学参数

本研究共设计并打印了 119 个椎弓根置钉导向器,共计 238 个椎弓根导向孔。术中在椎弓根置钉导向器的辅助下,共成功置入椎弓根螺钉 232 枚,辅助置钉成功率 97.5%(232/238),其中 2 枚导向器位于侧凸顶椎凹侧放置困难,1 枚位于后凸顶点放置不稳,最终放弃椎弓根螺钉置入。术后 2 周 CT 测量椎弓根置钉准确性,其中 0、1、2 和 3 级椎弓根螺钉数目依次为 111 枚、84 枚、33 枚和 4 枚,置钉准确率为 84.1%。

患者术后 2 周的主弯 Cobb 角、后凸角、冠状面平衡和脊柱矢状位轴较术前参数均得到显著纠正($P<0.05$),末次随访的主弯 Cobb 角、后凸角、冠状面平衡和脊柱矢状位轴较术后 2 周无显著差异($P>0.05$,表 2)。

2.2 置钉相关并发症

本研究的 13 例患者中,1 例患者术后第 3 天出现左下肢 L3 神经根支配皮区疼痛,左下肢肌力 4 级。急诊 CT 检查发现 L3 左侧椎弓根发育不

良,椎弓根狭小,椎弓根螺钉穿破椎弓根皮质内侧 3mm,未见明显脊髓或神经根压迫,予以脱水、营养神经治疗,同时密切观察,1 周后症状缓解。3 个月随访,患者左下肢肌力 5 级。

3 讨论

本研究将 3D 打印技术应用于重度脊柱畸形手术,通过设计个性化的椎弓根置钉导向器,成功辅助了 232 枚椎弓根螺钉的置入,置钉准确率可达 84.1%,未发生严重置钉相关并发症,术后矫形效果良好。本研究表明,3D 打印的椎弓根置钉导向器对于重度脊柱畸形手术矫形安全有效。

椎弓根置钉导向器在脊柱外科的初步应用取得了令人满意的结果^[6,7]。2017 年 Putzier 等^[8]进行了一项初步研究,通过设计的椎弓根置钉导向器为 4 例脊柱侧凸患者置入 76 枚椎弓根螺钉,置钉准确率高达 96.1%。此后 Liu 等^[9]将设计的椎弓根置钉导向器用于 10 名重度脊柱侧凸(Cobb 角 $>70^\circ$)患者,置钉准确率达到 93.8%。Li 等^[10]将此技术用于下颈椎,通过在 3D 的椎体模型上研究,发现椎弓根置钉导向器辅助下的横断面和矢状面置钉准确率分别为 99.5%和 97%。Yu 等^[11]采用类似的技术用于颈椎的尸体研究,同样得到了 96.3%的置钉准确率。本研究的置钉准确率较上述研究稍低,这可能与我们的研究对象有关。本研究纳入的患者主弯 Cobb 角均大于 90° ,平均 Cobb 角高达 $110.6^\circ\pm 15.2^\circ$ 。先前报道的最大平均度数为 87.3° ,侧凸的严重程度远低于本研究^[8,9]。此外 10 例患者是先天性脊柱侧凸,1 例为 1 型神经纤维瘤病性脊柱侧凸,相比特发性侧凸,这两类患者的椎弓根常伴发育不良甚至缺如,这也不可避免地降低了依靠 CT 评估的置钉准确率^[12]。本研究团队另有暂未发表的测量数据显示,先天性脊柱侧凸异常椎弓根的发生率显著高于特发性脊柱侧凸(64% vs 56%)。对于松质骨通道小于 2mm,甚至完全为皮质骨的椎弓根,我们在钉道设计过程中采取了“宁外勿内”的原则,尽量使钉道向椎弓根外侧而避免突破椎弓根内侧皮质而造成脊髓损伤。术后 CT 评估螺钉突破外侧椎弓根皮质超过 2mm,我们仍严格遵照 CT 评价标准,将其认定为不准确置钉,但通常突破椎弓根外侧皮质不会造成严重的神经并发症。此外,本组病例无 1 例出现严重的神经并发症也进一步说明了椎弓根置

表 2 影像学参数

Table 2 The parameters of radiographs

	术前 Preoperation	术后 2 周 Postoperative 2 weeks	末次随访 Final follow-up
主弯 Cobb 角($^\circ$) Cobb angle of major curve	110.6 $\pm$ 15.2	52.3 $\pm$ 16.2 ^①	50.6 $\pm$ 15.4 ^{①②}
后凸角($^\circ$) Kyphosis	58.3 $\pm$ 20.6	35.7 $\pm$ 10.4 ^①	33.5 $\pm$ 10.7 ^{①②}
冠状面平衡(cm) Coronal balance	2.8 $\pm$ 1.7	1.7 $\pm$ 0.5 ^①	1.6 $\pm$ 0.6 ^{①②}
脊柱矢状位轴(cm) Sagittal vertebral axis	3.1 $\pm$ 1.8	1.4 $\pm$ 0.4 ^①	1.5 $\pm$ 0.4 ^{①②}

注:①与术前相比 $P<0.05$;②与术后 2 周相比 $P>0.05$

Note: ①Compared with preoperative parameters, $P<0.05$; ②Compared with 2 weeks postoperative parameters, $P>0.05$

钉导向器在重度脊柱畸形临床应用中的安全性。

本研究中的椎弓根置钉导向器是通过单个椎体的后方骨性结构实现完全贴合的。每个导向器具有两个导向钉道,并通过连接杆的连接,骑跨椎体棘突,以两侧的椎板和横突的骨性结构设计支撑面。两侧横突和中间的棘突构成的“W”形骨性结构,这部分特殊结构恰好作为凹面,导向器的支撑面呈凸面,与其完整贴合,且修剪后的支撑面不会受邻近椎板的影响。本研究患者术前 CT 检测采取仰卧位,虽然术中体位变化可能会给脊柱序列、椎体旋转造成一定程度的影响,但是单个椎体的骨性结构在短期内是不可能发生改变的。因此,我们认为基于单个椎体设计的导向器不受体位改变的影响。此外,导向器是根据椎体一对一设计的,导向器表面都会有编号标记,如 T12 右侧椎弓根的导向孔上会标记 T12R。术前我们会将设计的导向器与 1:1 比例打印的脊柱模型逐一匹配,确保导向器与对应椎体的椎板紧密贴合。术中我们暴露采用骨膜下剥离,保障视野清晰,充分显露椎板和两侧部分横突。然后将导向器安放在对应的椎体后方即可,导向器的支撑面是凸出的,与椎板横突构成的凹面可以实现稳定、完整的贴合。

各类辅助导航技术是当今脊柱外科的热门研究方向,主要包括 O 臂导航、CT 导航和 Renaissance 脊柱机器人导航,大量研究报道了它们在辅助置钉上的出色表现^[13,14]。但 CT 或 O 臂导航的射线暴露问题一直受到诟病^[15,16]。Oba 等^[17]发现,对于青少年特发性脊柱侧凸手术采用 O 臂导航,在置入前 8 枚椎弓根螺钉后导航的轨迹偏差率会显著增加,因此要小心谨慎。Renaissance 机器人是专门用于脊柱外科的,国际领先的导航系统,有着辅助置钉准确率高、射线暴露少的优点。然而,其高昂的价格很大程度限制了其临床推广^[18]。相比以上三种辅助导航系统,本研究使用的椎弓根置钉导向器操作简单,减少术中射线暴露,同时不会明显增加患者医疗费用,降低椎弓根螺钉置钉失误造成的神经血管并发症。

本研究结果中的 1 例患者术后出现左下肢肌力减弱,急诊 CT 检查发现 L3 左侧椎弓根螺钉穿破椎弓根皮质内壁 3mm。比较术前 CT 图像,发现 L3 左侧椎弓根发育不良,椎弓根皮质骨通道狭小,而术中我们采用的是常规直径 6.5mm 的椎弓根螺钉,螺钉型号选择不当可能是造成此处内侧

壁破损,且未累及椎管的主要原因。由于胸椎椎弓根普遍较腰椎狭小,因此胸椎置钉时我们会根据椎弓根横径选择直径合适的椎弓根螺钉,而对于腰椎,我们常忽视腰椎椎弓根发育异常的情况,导致使用的椎弓根螺钉直径偏大。重度复杂畸形常伴有椎弓根的发育异常,因此对于腰椎椎弓根的发育不良,我们术前需要仔细评估,并选择合适型号的螺钉,尽可能地避免椎弓根螺钉穿破内壁的发生。有研究通过术前 CT 测量椎弓根的皮质骨和松质骨横径将其分为 A 至 E 不同类型,并作为置钉前的客观评估工具^[12]。

当然,本研究也存在不足。首先,本研究缺乏与徒手置钉技术的对照。由于本研究的关注点在于为重度脊柱畸形置钉的难题提供解决方案,我们设定了苛刻的纳入条件(主弯 Cobb 角 $>90^{\circ}$),这很大程度限制了纳入的样本量。同时,考虑到射线暴露问题,对于术后无运动感觉功能异常的患者,术后并未常规行 CT 扫描,因此无法在统一的标准下比较徒手置钉技术和椎弓根置钉导向器的置钉准确性。

综上所述,椎弓根置钉导向器为重度脊柱畸形患者提供个性化的置钉辅助,有效提高了椎弓根螺钉置钉准确率。但该技术需要清晰暴露椎体后方骨性结构,可能会延长手术时间,同时术前 CT 扫描增加了患者的射线暴露。由于重度脊柱畸形属于脊柱外科最为高危高难的手术,且患者情况复杂多变,本研究样本量有限,椎弓根置钉导向器的临床意义还需要更大样本的对照研究进一步论证。

4 参考文献

1. Kwan MK, Chiu CK, Hasan MS, et al. Perioperative outcome of single stage posterior spinal fusion for severe adolescent idiopathic scoliosis (AIS) (cobb angle ≥ 90 degrees): the role of a dual attending surgeon strategy[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2019, 44(6): E348-E356.
2. Pahys JM, Guille JT. What's new in congenital scoliosis?[J]. J Pediatr Orthop, 2018, 38(3): e172-e179.
3. Sarwahi V, Amaral TD, Dworkin A, et al. Pedicle screws can eliminate the need for hemivertebrae excision in late presenting congenital scoliosis or kyphosis[J]. Spine J, 2013, 13(9): S143.
4. Ghandhari H, Tari HV, Ameri E, et al. Vertebral, rib, and intraspinal anomalies in congenital scoliosis: a study on 202 Caucasians[J]. Eur Spine J, 2015, 24(7): 1510-1521.

5. Bartley CE, Yaszay B, Bastrom TP, et al. Perioperative and delayed major complications following surgical treatment of adolescent idiopathic scoliosis [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2017, 99(14): 1206–1212.
6. 王力冉, 赵刘军, 顾勇杰, 等. 3D 打印导航模板引导双侧下颈椎前路椎弓根螺钉置钉的可行性 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2016, 26(11): 1012–1017.
7. 王飞, 刘志斌, 张建华, 等. 3D 打印导航模板在辅助寰枢椎椎弓根螺钉置入中的应用价值[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2017, 27(1): 61–68.
8. Putzier M, Strube P, Cecchinato R, et al. A new navigational tool for pedicle screw placement in patients with severe scoliosis: a pilot study to prove feasibility, accuracy, and identify operative challenges[J]. *Clin Spine Surg*, 2017, 30(4): E430–E439.
9. Liu K, Zhang Q, Li X, et al. Preliminary application of a multi-level 3D printing drill guide template for pedicle screw placement in severe and rigid scoliosis[J]. *Eur Spine J*, 2017, 26(6): 1684–1689.
10. Li F, Huang X, Wang K, et al. Preparation and assessment of an individualized navigation template for lower cervical anterior transpedicular screw insertion using a three-dimensional printing technique[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2018, 43(6): E348–e356.
11. Yu Z, Zhang G, Chen X, et al. Application of a novel 3D drill template for cervical pedicle screw tunnel design: a cadaveric study[J]. *Eur Spine J*, 2017, 26(9): 2348–2356.
12. 李宁, 王杰, 罗明, 等. 营养不良型和非营养不良型神经纤维瘤病性脊柱侧凸中异常椎弓根发生率的比较[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2018, 28(5): 434–439.
13. Kotani T, Akazawa T, Sakuma T, et al. Accuracy of pedicle screw placement in scoliosis surgery: a comparison between conventional computed tomography-based and O-arm-based navigation techniques[J]. *Asian Spine J*, 2014, 8(3): 331–338.
14. Jin M, Liu Z, Liu X, et al. Does intraoperative navigation improve the accuracy of pedicle screw placement in the apical region of dystrophic scoliosis secondary to neurofibromatosis type I: comparison between O-arm navigation and free-hand technique[J]. *Eur Spine J*, 2016, 25(6): 1729–1737.
15. Kobayashi K, Ando K, Ito K, et al. Intraoperative radiation exposure in spinal scoliosis surgery for pediatric patients using the O-arm (R) imaging system [J]. *Eur J Orthop Surg Traumatol*, 2018, 28(4): 579–583.
16. Urbanski W, Jurasz W, Wolanczyk M, et al. Increased radiation but no benefits in pedicle screw accuracy with navigation versus a freehand technique in scoliosis surgery[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2018, 476(5): 1020–1027.
17. Oba H, Ebata S, Takahashi J, et al. Pedicle perforation while inserting screws using O-arm navigation during surgery for adolescent idiopathic scoliosis: risk factors and effect of insertion order [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2018, 43(24): E1463–E1468.
18. 方国芳, 吴子祥, 樊勇, 等. Renaissance 脊柱机器人辅助手术系统在脊柱疾病中的应用[J]. *中华创伤骨科杂志*, 2017, 19(4): 299–303.
(收稿日期:2018–10–28 末次修回日期:2019–01–08)
(英文编审 庄乾宇/贾丹彤)
(本文编辑 姜雅浩)