

· 基础研究 ·

个体化 3D 打印导向模板辅助胸腰椎椎弓根螺钉置入在强直性脊柱炎中的应用研究

李超, 牛国旗, 蒋维利, 陈辉, 刘路坦, 周乾坤, 程嘉伟
(蚌埠医学院第二附属医院骨科, 安徽 蚌埠 233000)

【摘要】 目的: 评价个体化设计定制 3D 打印椎弓根螺钉导向模板辅助强直性脊柱炎(ankylosing spondylitis, AS) 患者胸腰椎椎弓根螺钉置入的准确性与安全性。方法: 纳入 2016 年 1 月至 2019 年 9 月收治的 8 例 AS 患者的胸腰椎三维 CT 检查数据, 利用 Mimics 17.0、ideaMaker 等计算机软件设计 AS 胸腰椎椎弓根螺钉导向模板, 并利用 3D 打印机打印制作全部病例的实体模型(T₁₀-L₂), 每例 2 份, 分为导板辅助螺钉置入组(实验组)和徒手置钉组(对照组)。两组胸腰椎椎弓根螺钉均由同一名脊柱外科医师负责置入。根据术后 CT 影像结果评估两组椎弓根螺钉置入的准确性, 并对螺钉置入情况进行分级: 0 级和 1 级螺钉为可接受置钉, 2 级和 3 级为不可接受置钉。同时比较术前 3D 打印软件虚拟设计的椎弓根螺钉的直径、长度、进钉点与后正中线的距离等指标与术中实际使用情况。结果: 导板辅助螺钉置入组设计并打印出 AS 胸腰椎 3D 打印椎弓根螺钉导向模板 23 块, 辅助置入螺钉 46 枚, 可接受螺钉为 44 枚; 置入单枚螺钉平均时间为(4.20±1.15) min, X 线机透视次数为(5.00±1.25)次, 置钉过程中螺钉和克氏针平均调整次数为(1.76±1.32)次。徒手置钉组使用传统影像学透视徒手方法置钉 46 枚, 可接受螺钉 30 枚; 置入单枚螺钉平均时间为(14.67±2.23) min, X 线机透视次数为(14.46±2.21)次, 螺钉和克氏针平均调整次数为(4.76±3.39)次。导板辅助螺钉置入组与徒手置钉组螺钉置入成功率分别为 95.65%(44/46)和 56.22%(30/46), 差异有统计学意义($\chi^2=13.538, P<0.05$); 术前 3D 打印软件虚拟设计的椎弓根螺钉的直径、长度、进钉点与后正中线的距离, 与术中实际使用情况差异无统计学意义($P>0.05$); 导板辅助螺钉置入组置入单枚螺钉的时间、X 线机透视次数及置钉过程中螺钉和克氏针平均调整次数均明显少于徒手置钉组($P<0.01$)。结论: 3D 打印技术定制个体化椎弓根螺钉导向模板显著提高了置钉的安全性、准确性及手术效率, 尤其适用于 AS 合并骨折脱位等须行后路椎弓根螺钉固定的胸腰椎椎体。

【关键词】 打印, 三维; 脊柱炎, 强直性; 个体化医学

中图分类号: R681.5

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.2020.07.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Experimental study of individualized 3D printing-guided template combined with thoracolumbar pedicle screw placement for the treatment of ankylosing spondylitis LI Chao, NIU Guo-qi, JIANG Wei-li, CHEN Hui, LIU Lu-tan, ZHOU Qian-kun, and CHENG Jia-wei. Department of Orthopaedics, the Second Affiliated Hospital of Bengbu Medical College, Bengbu 233000, Anhui, China

ABSTRACT **Objective:** To evaluate accuracy and safety of individualized 3D printing-guided template for thoracolumbar pedicle screw placement in patients with ankylosing spondylitis. **Methods:** From January 2016 to September 2019, thoracolumbar spine three-dimensional CT data of 8 patients with ankylosing spondylitis were included, Mimics 17.0 and ideaMaker computer software were applied to design thoracolumbar pedicle screw guided template of patients with AS, physical model of all patients (T₁₀-L₂) were printed by 3D printer, 2 parts in each patient, and divided into guide-plate-assisted screw group (experimental group) and free-hand nail group (control group). Thoracolumbar pedicle screws of both groups were placed by the same spinal surgeon. The accuracy of pedicle screw placement between two groups were evaluated according to results of post-operative CT, the accuracy of the fixation of thoracolumbar pedicle screw was divided into 4 grades, grade 0 and 1 screws were acceptable nails, grade 2 and 3 screws were unacceptable nails. The diameter and length of pedicle screws, the distance between entry point and posterior median line designed by preoperative 3D printing were compared with actual use in operation. **Results:** Twenty-three blocks of thoracolumbar 3D printing screw of ankylosing spondylitis guided templates were designed and printed in guide-plate-assisted screw group, 46 screws were inserted and 44 screws were accepted. The time of implanting a

基金项目: 安徽省科技攻关项目(编号: 1804h08020247); 蚌埠医学院研究生科研创新计划项目(编号: Byyex1970)

Fund program: Project of Tackling Key Problems in Science and Technology in Anhui Province (No. 1804h08020247)

通讯作者: 牛国旗 E-mail: ssngq@163.com

Corresponding author: NIU Guo-qi E-mail: ssngq@163.com

screw into thoracolumbar pedicle was (4.20 ± 1.15) min, the frequency of X-ray was (5.00 ± 1.25) times and the average adjustment times of screw and Kirschner needle during screw placement was (1.76 ± 1.32) times. In the control group, 46 nails were placed by traditional surgical method and 30 screws were accepted. The time of implanting a screw into thoracolumbar pedicle was (14.67 ± 2.23) min, the frequency of X-ray fluoroscopy was (14.46 ± 2.21) times and the average times of Kirschner needle adjustment was (4.76 ± 3.39) times. The success rates between experimental group and control group were 95.65% (44/46) and 56.22% (30/46) respectively, and had statistical difference ($\chi^2=13.538, P<0.05$). There was no significant difference in diameter, length of pedicle screws and the distance of posterior median line between virtual designed by 3D printing before operation and actual situation in operation ($P>0.05$). The operation time of inserting a single screw, the times of X-ray fluoroscopy, and the average times of adjustment screw and Kirschner needle in experimental group were significant less than those in control group ($P<0.01$). **Conclusion:** The personalized guide template assisted the thoracolumbar fixation designed by 3D printing could significantly improve safety, accuracy and efficiency of surgery, especially suitable for thoracolumbar vertebral bodies requiring posterior pedicle screw fixation for fracture or dislocation with AS.

KEYWORDS Printing, three-dimensional; Spondylitis, ankylosing; Individualized medicine

强直性脊柱炎 (ankylosing spondylitis, AS) 是一种主要累及骶髂关节和脊柱关节, 以损害中轴关节为主的慢性炎症性疾病^[1]。脊柱侵蚀主要的病理改变为韧带和副韧带骨化桥接、椎间盘的钙化以及骨质的过度生长, 从而导致关节的强直, 并造成关节的疼痛、畸形。由于运动性丢失和继发性骨质疏松, AS 患者的脊柱脆性增加、刚性降低, 无外力或者轻微的外力即可导致脊柱骨折^[2]。颈椎是骨折发生常见的部位, 但临床上胸腰椎骨折比之前报道的更常见^[3]。由于 AS 合并胸腰椎骨折具有其独特的临床特点, 这也使得与普通脊柱骨折的治疗方法略有不同, 近年来, 临床上大多采用手术治疗^[4]。目前, 多采用后路椎弓根钉棒内固定系统治疗 AS 合并胸腰椎骨折。但是, 由于 AS 后期病理改变导致正常解剖标志难以辨识, 加之常伴有脊柱的后凸畸形, 使得椎弓根螺钉的置入更加具有挑战性。随着数字化技术迅速发展, 个性化设计定制 3D 打印导向模板辅助置钉技术, 引导术中精准置钉, 可有效解决椎弓根螺钉置钉安全问题^[5]。本研究依据 AS 患者胸腰椎三维 CT 扫描数据, 结合影像学资料、3D 打印技术和逆向工程原理设计出胸腰椎椎弓根螺钉个体化 3D 打印导向模板, 旨在观察 3D 打印导向模板辅助 AS 胸腰椎椎弓根螺钉置入的实验性效果, 为进一步的临床应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

自 2016 年 1 月至 2019 年 9 月收集 8 例 AS 患者的胸腰椎三维 CT 检查数据 (128 层薄层 CT, 层厚 0.5 mm), 将 CT 数据转化成 DICOM 格式, 导入 Mimics 17.0 (比利时, Materialise 公司) 软件, 利用 3D 打印机打印制作全部病例的实体模型 (T_{10} - L_2), 每例各 2 份, 分为导板辅助螺钉置入组 (实验组) 和徒手置钉组 (对照组)。纳入标准: (1) 影像学及病历资料完整者。 (2) 确诊为 AS 的患者。其中男 7 例, 女

1 例, 年龄 30~55 (50.56 ± 2.35) 岁。

1.2 导板设计

8 例患者均行 64 排螺旋 CT 薄层扫描, 将扫描后的胸腰椎三维 CT 数据以 DICOM 格式保存, 导入可以自动检测、识别 DICOM 格式文件的 Mimics 软件中进行 AS 胸腰椎 3D 重建, 选取 T_{10} - L_2 节段椎体, 在软件中模拟出胸腰椎椎弓根螺钉, 在每个需要实验置钉的椎体上拟合出最佳的进钉点、螺钉通道及螺钉长度, 确保螺钉位于骨皮质内, 并记录虚拟螺钉的长度。同时, 在 Mimics 软件中以螺钉轨道为参考, 设计出外径 8 mm, 内径 4 mm, 长 15~20 mm 的置钉导向圆管, 并根据 AS 胸腰椎不同椎体的解剖形态, 在椎体后方设计出与其解剖形态相一致的反向导板, 通过逻辑运算将最佳进钉通道和反向模板贯通, 拟合为一体, 设计出最终的胸腰椎椎弓根螺钉置钉个体化导板。将设计好的导板以 .STL 格式保存。

1.3 模型及导板打印

将重建的 3D 模型数据同样以 .STL 格式保存, 导入 ideaMaker 软件, 进一步调整模型打印的二维方位、冠状面、矢状面。将设定完成的模型以 gcode 格式导入 3D 打印机内, 以 PLA 为打印材料, 1:1 等比例打印脊柱模型, 打印参数设置为: 单层层高 0.25 mm, 模型壁厚 2.00 mm, 填充率 10.0%, 填充速度 70.0 mm/s, 打印底座、外部支撑及脊柱模型。并以同样的方法 3D 打印出设计完成的导向模板。模型和导向模板打印成功后去除底座和外部支撑, 通过脊柱模型可以清晰显示出 AS 胸腰椎不同椎体的解剖关系, 以及每个椎体上下关节突、横突、棘突及椎弓根位置和形态。术后将 3D 打印的 AS 胸腰椎模型、与之匹配的导向模板进行去粗糙处理、匹配性测试, 匹配性测试良好方可进行模拟手术 (图 1)。

1.4 置钉方法

1.4.1 导板辅助螺钉置入组 将 3D 打印模型模拟真实患者俯卧时的体位并固定于手术床上, 模拟

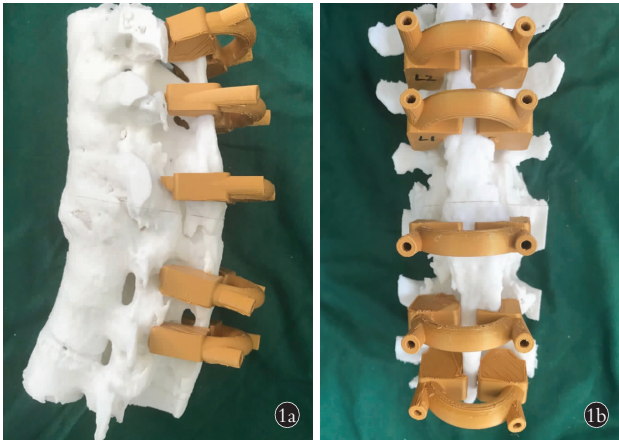


图 1 经过去粗糙处理、匹配性测试的 3D 打印强直性脊柱炎胸腰椎模型及与之匹配的导向模板 1a. 侧面观 1b. 后面观

Fig. 1 3D printed by de-roughening and matching test ankylosing spondylitis thoracolumbar spine model and matched guide plate 1a. Lateral view 1b. Posterior view

常规手术进行铺巾,暴露出手术所需视野,充分显露其背侧棘突等结构(图 2)。将个体化 3D 打印导向模板和与之相匹配的椎体进行充分贴附,调试吻合良好后,由助手帮忙固定。术者使用直径为 2.0 mm 的克氏针顺着导板自带套筒方向钻孔,当克氏针钻入骨皮质时,继续钻孔,当克氏针置入深度接近软件中



图 2 导板辅助螺钉置入组模拟常规手术照片 2a, 2b, 2c. 模拟常规手术的消毒铺巾,充分暴露模型后方的解剖结构,将导板贴附于模型上后置入克氏针初步定位

Fig. 2 Ordinary surgical photo simulated by guide-plate-assisted screw 2a, 2b, 2c. Simulated disinfection shop towel, fully expose the anatomical structure behind model, attach the guide plate to the model and place the Kirschner wire for preliminary positioning

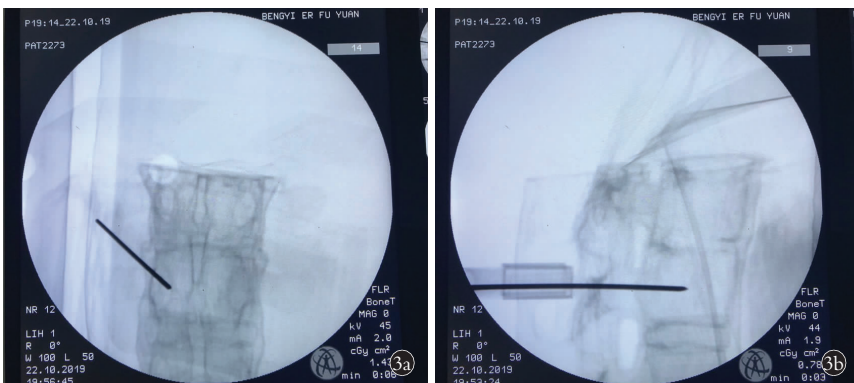


图 3 导板辅助螺钉置入组术后 X 线透视显示定位均良好 3a. 正位 3b. 侧位

Fig. 3 Postoperative X-ray of guide-plate-assisted screw group showed good position 3a. AP X-ray 3b. Lateral X-ray

测量的虚拟螺钉长度时,取下导向模板,用开路锥扩孔,丝锥攻丝、测量钉道深度,选取并拧入匹配的胸腰椎椎弓根螺钉,C 形臂 X 线机正侧位透视显示螺钉位置良好后完成置钉(图 3)。

1.4.2 徒手置钉组 同样方法固定模型,参照横突和上下关节突残留间隙,用咬骨钳咬除部分骨赘以显露出适合进针点的解剖位置,胸腰椎分别采用 Roy-Camille 法和“人”字峰顶点法进钉,C 形臂 X 线机正侧位透视显示螺钉位置良好后完成置钉(见图 4-5)。

1.5 观察项目与方法

(1)分别记录两组患者手术中实际置入螺钉长度、置入单枚螺钉所需时间、透视次数和置入过程调整螺钉的次数。其中单枚螺钉的置入时间计算方法为:导板辅助螺钉置入组从贴附导板开始计时,X 线透视正侧位螺钉位置良好后计时结束;徒手置钉组从开始置入定位计时,X 线透视正侧位螺钉位置良好后及时结束。置入过程调整螺钉次数为:两组在置入螺钉过程中根据手感或者透视结果不满意时对螺钉进行的调整次数。(2)两组胸腰椎模型(T₁₀-L₂)术后均再次用相同参数、方式的 CT 扫描,测量两组椎弓根螺钉的直径和长度以及进钉点与后正中线的距离等指标^[6],并将螺钉置入结果分为 4 个等级^[7],



图 4 徒手置钉组模拟常规手术照片 4a,4b. 当透视显示定位良好后,取下导向模板,用开路锥扩孔,丝锥攻丝、测量钉道深度 4c. 选取并打入匹配的胸腰椎椎弓根螺钉,拧入后用 X 线透视验证螺钉位置准确性

Fig.4 Surgical photo of simulated routine operation in freehand nail group 4a,4b. Guide template was taken out when fluoroscopy showed good position, enlarge the hole with an open tap, tap the tap, depth of screw path was measured 4c. Matched thoracolumbar pedicle screw was selected and screwed, X-ray was used to test accuracy of position of screw

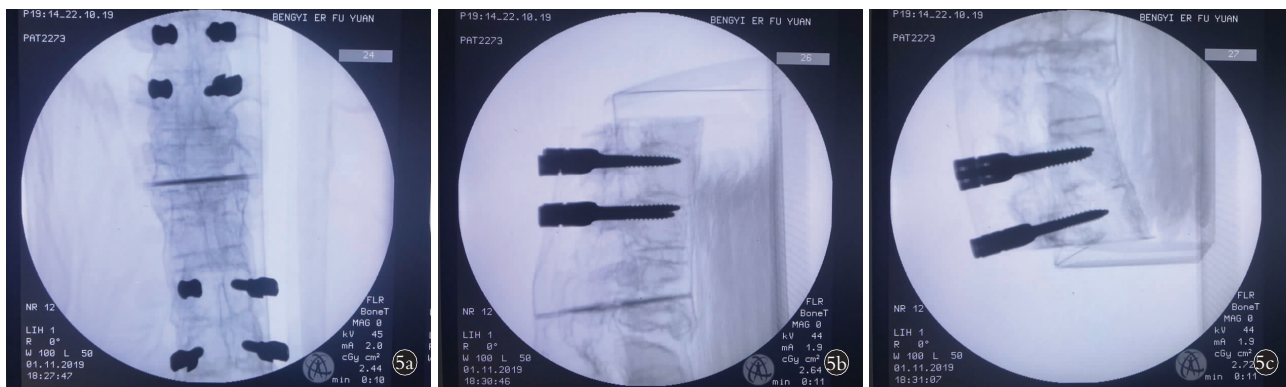


图 5 徒手置钉组术后 X 线显示螺钉位置良好 5a. 正位 5b,5c. 侧位

Fig.5 Postoperative X-ray machine in freehand nail group showed that screws were on good position 5a. AP X-ray 5b,5c. Lateral X-rays

0 级为螺钉无穿破椎弓根皮质,1 级为螺钉穿破椎弓根皮质,但穿破距离为 0~2 mm,2 级为螺钉穿破椎弓根皮质,穿破距离均处于为 2~4 mm,3 级为螺钉穿破椎弓根皮质距离>4 mm。0 级和 1 级螺钉为可接受置钉,2 级和 3 级为不可接受置钉。

1.6 统计学处理

采用 SPSS 18.0 软件进行统计学分析,定量资料以均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示。术前 3D 打印软件虚拟设计与术中实际使用情况比较、导板辅助螺钉置入组和徒手置钉组相关指标比较均采用配对 *t* 检验,检验水准 $\alpha=0.05$ 。导板辅助螺钉置入组与徒手置钉组螺钉置入的可接受情况比较采用 χ^2 检验,检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

导板辅助螺钉置入组设计并打印出胸腰椎(T₁₀-L₂)3D 打印导向模板 23 块,辅助置入螺钉 46 枚;徒手置钉组使用 C 形臂 X 线机透视法置入胸腰椎椎弓根螺钉 46 枚。两组在术中均发现采用术前 3D 打印软件虚拟设计的椎弓根螺钉的直径、长度、进钉点与后正中线的距离等指标与术中实际使用情况比较

差异无统计学意义($P>0.05$),见表 1。导板辅助螺钉置入组单枚螺钉置入时间、X 线机透视次数和螺钉调整次数均显著优于徒手置钉组($P<0.01$),见表 2。导板辅助螺钉置入组和徒手置钉组螺钉置入可接受率分别为 95.65%(44/46)和 56.22%(30/46),差异有统计学意义($\chi^2=13.538, P=0.000$)。

表 1 导板辅助螺钉置入组术前 3D 打印软件虚拟设计与实际使用对比($\bar{x} \pm s$, mm, n=46)

Tab.1 Comparison of preoperative virtual design by 3D printing software and intraoperative practice in guide plate group($\bar{x} \pm s$, mm, n=46)

项目	术前设计	术中实际使用	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
螺钉的直径	6.40±0.46	6.24±0.25	-1.772	0.083
螺钉的长度	41.59±2.95	41.85±2.44	0.864	0.392
进钉点与后正中线的距离	28.61±2.70	29.43±2.60	1.974	0.055

3 讨论

AS 合并胸腰椎骨折常累及脊柱的三柱结构,贯

表 2 导板辅助螺钉置入组和徒手置钉组相关指标比较
($\bar{x} \pm s$)

Tab.2 Comparison of related indexes between guide plate group and free-handed group($\bar{x} \pm s$)

组别	例数	置钉时间 (min)	X 线机透视次数(次)	螺钉和克氏针调整次数(次)
导板辅助螺钉置入组	8	4.20±1.15	5.00±1.25	1.76±1.32
徒手置钉组	8	14.67±2.23	14.46±2.21	4.76±3.39
<i>t</i> 值		-28.321	-25.291	-6.871
<i>P</i> 值		0.000	0.000	0.000

穿椎体和椎间盘,且此种骨折在发病初期常常很难发现,容易造成误诊或延迟诊断,持续的脊柱运动将最终导致假关节形成和贯通骨折,发生脊髓损伤的风险较高,易导致截瘫。因椎体骨质破坏,前中柱受压可出现后凸畸形,且后凸畸形产生后椎体前方受压更加明显,进一步引起畸形加重导致脏器损伤而威胁生命^[8],AS 脊柱骨折患者比正常人群骨折后生存率大大降低。且由于骨质侵蚀、骨赘形成、韧带骨化、脊柱生理弯曲改变等因素,AS 患者较同龄人群更容易出现椎间盘突出、椎管狭窄等病变,而导致脊髓、神经的压迫及骨折不愈合率增加^[4]。因此,临床上对于此类患者须尽早进行手术治疗,采用后路椎弓根螺钉内固定可有效维持脊柱稳定性,为骨折愈合提供良好的基础^[9]。手术过程中,确保椎弓根螺钉置入的关键是正确的解剖定位,但是,由于 AS 患者的病理性改变,导致节段后凸畸形、后柱关节突关节及“人”字嵴等椎弓根螺钉进钉的解剖标志异常,此外,椎体骨质疏松内固定时极易发生椎弓钉松动,再加之许多重要解剖标志在 AS 脊柱 X 线片上显示不清,给临床医生在手术置钉过程带来了严峻的挑战。所以,手术医师在制定手术方案时不能简单地遵循传统的脊柱内固定原则^[6,10-11]。

近年来,随着 3D 打印技术的迅速发展,其在数字骨科的应用也越加广泛。脊柱解剖结构复杂,毗邻重要的血管神经及重要脏器,而 3D 打印脊柱模型的应用可以使临床医师更加直观、具体地了解患者的病情,给手术团队带来极大便利。AS 患者各椎节呈融合状态,局部解剖不清,术中利用传统的咬骨钳等器械,操作幅度大,且不易控制,加大了对椎体和周围神经损伤的可能性。快速准确的螺钉置入,减少了手术和俯卧位的时间,尤其对于已发生并发症的患者,不仅可以减少椎体创伤,而且有利于最后顺利置棒,对于进钉点和进钉方向难度更大的 AS 胸腰椎骨折患者,3D 打印技术的应用,可以提高置钉及置棒的准确率,同时使手术整体成功率增加^[12-13]。近

几年 3D 打印导板在骨科手术中被广泛应用,导板辅助置钉技术可以在不需要昂贵设备的条件下减少手术操作的复杂性^[14]。Tu 等^[15]首次将 3D 打印导板应用于 AS 继发严重脊柱后凸畸形的矫形中,研究结果显示 3D 打印导板可以在 AS 畸形矫形术前模拟及术中指导发挥重要作用,对截骨手术后患者功能恢复有显著效果。

本研究基于 AS 患者胸腰椎 CT 数据,利用 3D 打印技术快速制造、精准还原的特点,在软件中重建个体化脊柱模型,并根据每个椎体不同的解剖特点设计并精确、快速地 3D 打印出与骨面贴附良好的、任意复杂曲面结构的导板,且成品精度高,与患者真实骨性结构比例也为 1:1。应用导向模板在模型上模拟整个手术置钉过程,结果显示应用导板辅助置钉组在置钉时间、透视次数、螺钉准确率等方面显著优于徒手置钉组;Xu 等^[16]和 Tan 等^[17]将 3D 打印导向模板用于胸腰椎脊柱手术中,结果均显示 3D 打印技术可以显著提高胸腰椎椎弓根螺钉置钉准确率,减少了误差,这与本研究得出的结果相同。在实际手术中,为了方便置钉,寻找精准的进针点,徒手置钉需要咬除椎体固化组织及骨赘,不但增长了手术时间,还有可能增加术中出血量,增加了周围神经损伤等术后并发症的发生率。而应用 3D 打印导板可以直接与椎体相贴合,减少组织损伤,提高手术的安全性以及手术的整体成功率;术前在虚拟软件中模拟出最佳钉道,测量出最佳螺钉长度,以期术中精准、快速的定位和置钉提供指导,降低了患者及手术医生术中 X 线暴露次数,一定程度上减少了医源性的损伤。椎弓根导向模板自带定位、导向功能,简单、方便,不会随着简单的体位改变导致定位失败,有利于螺钉的置入,且学习曲线较短,即使没有经验或者经验较少的年轻脊柱外科医生也能短时间内掌握置钉方法。此外,相对于导航和机器人辅助等置钉技术,3D 打印技术显著降低了材料及设备成本,一般医院皆可开展。

在模拟手术过程中应特别注意:在导板与相匹配椎体模型贴附吻合良好后不可移动导板;手术安全起见,置钉中开路椎扩孔、攻丝及螺钉拧入过程每前进一小段距离都要谨慎且都要在 X 线机下正侧位透视,显示螺钉角度有偏移时可做及时调整;另外,手感在置钉过程中尤为重要:应当感觉到有均匀的阻力,如阻力过大或阻力突然消失、有突破感或落空感,均表明钉道可能穿出了椎弓根。

本研究的不足如下:(1)3D 打印软件、逆向工程原理等软件需要精通或者操作熟练的脊柱外科人员才能完成导板的设计,需要一定的学习曲线。(2)若

模拟手术过程中椎体与相匹配的模型发生滑移,以及 3D 打印脊柱模型与临床患者置钉过程中手感稍有差别,人为因素降低了置钉的准确率。(3)数据提取、胸腰椎模型提取、导板设计、导板打印等环节需要一定时间完成,对于此类疾病的急诊手术尚有一定的局限性。因此,运用医学影像学、数字化 3D 重建技术、逆向工程、快速成型技术,设计出 AS 胸腰椎椎弓根螺钉置入的个体化 3D 打印导向模板,显著提高了置钉的安全性和准确性,尤其适用于 AS 合并骨折、脱位等需行后路椎弓根螺钉固定的胸腰椎椎体。

综上所述,3D 打印个体化导向模板 AS 胸腰椎椎弓根螺钉置钉导向模板体现了个体化的置钉原则,使用简单方便,具有置钉成功率高、安全、有效的特点,值得临床进一步的推广使用。

参考文献

- [1] Min Y, Hui YG, Hou CZ, et al. The surgical treatment strategies for thoracolumbar spine fractures with ankylosing spondylitis: a case report [J]. BMC Surg, 2019, 19(5): 99.
- [2] Lukasiewicz AM, Bohl DD, Varthi AG, et al. Spinal fracture in patients with ankylosing spondylitis: cohort definition, distribution of injuries, and hospital outcomes [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2016, 41(3): 191-196.
- [3] Leone A, Marino M, Dell'Atti C, et al. Spinal fractures in patients with ankylosing spondylitis [J]. Rheumatol Int, 2016, 36(10): 1335-1346.
- [4] 刘蕊, 孙琳, 李常虹, 等. 强直性脊柱炎的脊柱手术原因分析 [J]. 北京大学学报(医学版), 2017, 49(5): 835-839.
LIU R, SUN L, LI CH, et al. Cause analysis of spinal surgery in ankylosing spondylitis [J]. Bei Jing Da Xue Xue Bao (Yi Xue Ban), 2017, 49(5): 835-839. Chinese.
- [5] 牛国旗, 代建昊, 汪东, 等. 个体化 3D 打印导向模板辅助上颈椎椎弓根螺钉置入的实验研究 [J]. 中华解剖与临床杂志, 2017, 22(5): 366-372.
NIU GQ, DAI JH, WANG D, et al. Experimental study of individualized 3D printing navigation template in the treatment of upper cervical pedicle screw placement [J]. Zhonghua Jie Pou Yu Lin Chuang Za Zhi, 2017, 22(5): 366-372. Chinese.
- [6] 杨泗华, 张翔, 于一凡, 等. 3D 打印辅助经后路椎弓根钉棒内固定治疗强直性脊柱炎合并胸腰段椎体骨折的临床应用研究 [J]. 中国数字医学, 2016, 11(7): 77-80, 87.
YANG SH, ZHANG X, YU YF, et al. Clinical application of 3D printing rapid prototyping assisted posterior reduction and pedicle screw-rod fixation in the treatment of thoracolumbar vertebral fracture with ankylosing spondylitis [J]. Zhongguo Shu Zi Yi Xue, 2016, 11(7): 77-80, 87. Chinese.
- [7] Aoude AA, Fortin M, Figueiredo R et al. Methods to determine pedicle screw placement accuracy in spine surgery: a systematic review [J]. Eur Spine J, 2015, 24(5): 990-1004.
- [8] 薛镜, 刘立岷, 宋跃明, 等. 经后路骨折间隙截骨治疗强直性脊柱炎胸腰椎应力骨折 [J]. 中国修复重建外科杂志, 2018, 32(5): 531-535.
XUE J, LIU LM, SONG YM, et al. Posterior osteotomy for thoracolumbar stress fracture in ankylosing spondylitis through the gap of a pathological fracture [J]. Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi, 2018, 32(5): 531-535. Chinese.
- [9] 闫亮, 贺宝荣, 郭华, 等. 脊柱后路 2 种内固定技术治疗胸腰椎爆裂骨折的疗效评估 [J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2017, 32(7): 680-683.
YAN L, HE JR, GUO H, et al. Clinical evaluation of two types of posterior internal fixation system for treatment of thoracolumbar burst fractures [J]. Zhongguo Gu Yu Guan Jie Sun Shang Za Zhi, 2017, 32(7): 680-683. Chinese.
- [10] Bredin S, Fabre-Aubrespy M, Blondel B, et al. Percutaneous surgery for thoraco-lumbar fractures in ankylosing spondylitis: Study of 31 patients [J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2017, 103(8): 1235-1239.
- [11] 马骏雄, 刘军, 项良碧. 合并强直性脊柱炎的颈椎骨折手术策略: 根据损伤类型选择术式 [J]. 中国矫形外科杂志, 2018, 26(10): 955-958.
MA JX, LIU J, XIANG LB. Surgical strategy of cervical fracture with ankylosing spondylitis: selection of surgical methods according to the type of injury [J]. Zhongguo Jiao Xing Wai Ke Za Zhi, 2018, 26(10): 955-958. Chinese.
- [12] 姜平, 李念虎, 魏传付, 等. 后路长节段经皮置钉内固定术治疗强直性脊柱炎并胸腰椎骨折的临床效果 [J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2019, 29(4): 303-309.
JIANG P, LI NH, WEI CF, et al. Observational study on the treatment of ankylosing spondylitis with thoracolumbar fracture with posterior long segmental percutaneous fixation [J]. Zhongguo Ji Zhu Ji Sui Sun Shang Za Zhi, 2019, 29(4): 303-309. Chinese.
- [13] Patel K, Tajsic T, Budohoski KP, et al. Simultaneous navigated cervico-thoracic and thoraco-lumbar fixation [J]. Eur Spine J, 2018, 27: 318-322.
- [14] 吴晓宇, 董谢平, 吴彦超, 等. 3D 打印颈椎前路椎弓根螺钉导板的准确性评估 [J]. 中国矫形外科杂志, 2018, 26(6): 538-542.
WU XY, DONG XP, WU YC, et al. Accuracy assessment of 3D printed guider for cervical anterior transpedicular screw insertion in Sawbones cervical models [J]. Zhongguo Jiao Xing Wai Ke Za Zhi, 2018, 26(6): 538-542. Chinese.
- [15] Tu Q, Ding HW, Chen H, et al. Three-dimensional-printed individualized guiding templates for surgical correction of severe kyphoscoliosis secondary to ankylosing spondylitis: outcomes of 9 cases [J]. World Neurosurg, 2019, 130: 961-970.
- [16] Xu W, Zhang X, Ke T, et al. 3D printing-assisted preoperative plan of pedicle screw placement for middle-upper thoracic trauma: a cohort study [J]. BMC Musculoskelet Disord, 2017, 18(1): 348.
- [17] Tan LA, Yerneni K, Tuchman A, et al. Utilization of the 3D-printed spine model for freehand pedicle screw placement in complex spinal deformity correction [J]. J Spine Surg, 2018, 4(2): 319-327.

(收稿日期: 2020-02-10 本文编辑: 王宏)