

DOI:10.16781/j.0258-879x.2016.02.0231

• 短篇论著 •

## 3D 打印在脊柱侧凸矫形中的应用初探

李彦明, 李明\*, 张国友, 陈自强, 赵颖川, 倪海键, 白玉树  
第二军医大学长海医院脊柱外科, 上海 200433

**[摘要]** **目的** 根据 CT 断层扫描数据, 利用 3D 打印技术建立患者的脊柱实体模型, 并探讨其在脊柱矫形手术中的应用。**方法** 回顾性分析第二军医大学长海医院脊柱外科在采用 3D 打印技术重建病变节段脊柱前后, 两组脊柱侧凸患者矫形术中置钉时间、置钉准确率、神经血管损伤发生率差异等情况。**结果** 未使用 3D 打印技术组患者 30 例, 共置入椎弓根螺钉 466 枚, 平均置钉时间  $(3.1 \pm 0.5)$  min, 置钉准确率为 85.6% (399/466); 使用 3D 打印技术组患者 23 例, 共置入椎弓根螺钉 354 枚, 平均置钉时间  $(2.1 \pm 0.4)$  min, 置钉准确率为 93.2% (330/354)。两组置钉时间和置钉准确率差异具有统计学意义 ( $P < 0.01$ )。所有患者术中和术后均未出现神经、血管和内脏损伤等并发症。**结论** 与传统的未使用 3D 打印技术的徒手置钉技术相比, 术前利用患者 CT 数据通过 3D 打印技术制作患者病变节段脊柱模型可为术者制定手术计划和置钉提供参考, 可以缩短置钉时间, 提高置钉准确率。

**[关键词]** 三维打印; 脊柱侧凸; 矫形外科学; 骨钉

**[中图分类号]** R 681.5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2016)02-0231-05

### Application of 3D printing in orthopedics of scoliosis

LI Yan-ming, LI Ming\*, ZHANG Guo-you, CHEN Zi-qiang, ZHAO Ying-chuan, NI Hai-jian, BAI Yu-shu  
Department of Spine Surgery, Changhai Hospital, Second Military Medical University, Shanghai 200433, China

**[Abstract]** **Objective** To establish a spine solid model of patients using 3D printing technique based on CT tomocan data, and to apply the model in spine orthopedics. **Methods** The time for placing the screws, the accuracy rate of screw placement, the incidence rates of nerve and blood vessel injury were retrospectively analyzed and compared before and after 3D printing technique was employed to rebuild the diseased segmental spine in two groups. **Results** A total of 466 pedical screws were placed in 30 patients who were not subjected to 3D printing technique, and the mean screwing time was  $(3.1 \pm 0.5)$  min, with an accuracy rate of 85.6% (399/466). While 354 pedical screws were placed in 23 patients who were subjected to 3D printing technique, and their mean screwing time was  $(2.1 \pm 0.4)$  min, with an accuracy rate of 93.2% (330/354). Significant differences were found for both the screwing time and accuracy between the two groups ( $P < 0.01$ ). No patients had complication such as injuries of the nerve, blood vessel or visceral injury during or after operation. **Conclusion** Compared to traditional free-hand screwing technique, preoperative 3D printing model of the diseased segmental spine can provide reference for operation planning and screwing, shortening the screwing time and improving the screwing accuracy.

**[Key words]** three-dimensional printing; scoliosis; orthopedics; bone nails

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2016, 37(2):231-235]

脊柱后路椎弓根螺钉固定技术因其具有三维固定等独特的优势, 现已经广泛应用于脊柱畸形、退变等脊柱疾病<sup>[1]</sup>。但由于脊柱侧凸存在多个椎体局部三维解剖结构变异, 如椎体旋转、椎管及椎弓根发育不对称、半椎体等, 增加了手术风险<sup>[2-3]</sup>。因此, 在脊柱侧凸患者中对每个椎弓根个体化设计置钉方案, 可以减少螺钉误置的风险。3D 打印技术是快速成

型技术之一<sup>[4]</sup>, 利用 CT 重建的三维数字模型, 通过 3D 打印机打印出拟手术节段的脊柱模型, 从而获得每个病变椎弓根的三维数据, 明确该椎弓根的形态大小、是否适合置钉及螺钉的型号, 直观地显示病变椎弓根的部位、范围及局部解剖情况, 并且还可以实现术前在模型上模拟置钉, 以达到完善术前规划的目的。第二军医大学长海医院脊柱外科自 2014 年 7 月

**[收稿日期]** 2015-05-28 **[接受日期]** 2015-12-20

**[作者简介]** 李彦明, 博士生, E-mail: lym20050404@aliyun.com

\* 通信作者 (Corresponding author). Tel: 021-81873387, E-mail: limingch@21cn.com

至12月在脊柱侧凸后路三维矫形术前采用3D打印技术制作患者病变节段的脊柱模型,制定相应的内置物置入计划,指导术中内置物安放,并与未采用3D打印技术的脊柱侧凸患者比较,报告如下。

## 1 资料和方法

1.1 病例资料 纳入研究的患者共53例,男9例、女44例。未使用3D打印组(对照组)共30例,其中男4例,女26例,年龄(22.2±15.3)岁;特发性脊柱侧凸25例,成人退变性脊柱侧凸4例,马凡综合征型脊柱侧凸1例;术前Cobb角41°~76°(61.0°±6.8°)。使用3D打印组共23例,其中男5例,女18例,年龄(20.8±14.0)岁;特发性脊柱侧凸19例,成人退变脊柱侧凸3例,马凡综合征型脊柱侧凸1例;术前Cobb角43°~78°(64.3°±8.6°)。两组在性别、年龄、Cobb角方面差异均无统计学意义( $P>0.05$ )。手术方式均为后路三维矫形植骨融合内固定术,均使用美国强生公司器械,手术均由我科同一位主任医师主刀。

1.2 术前3D模型制备与内置物置入计划 3D模型组患者术前行病变节段CT扫描。使用Siemens公司的64排螺旋CT,层厚0.64 mm。将CT扫描的DICOM格式的数据导入软件Mimics,构建出形态曲面,重建三维模型。保存数据格式为STL(surface tessellation language)格式。STL格式的数据是3D打印机所识别的数据,最终3D打印机将模型打印出来。术前直接观察脊柱三维形态,从任意角度和平面观察病变的区域、程度,根据结果决定需要固定和融合节段及椎弓根,避免在发育严重狭窄的椎弓根置钉。术中所见与术前3D模型一致,根据术前设计能够顺利、安全地完成手术。未使用3D模型组患者按照Lenke提出的徒手(free hand)置钉技术进行置钉<sup>[5]</sup>。

1.3 观察指标 (1)置钉时间:以显露后柱骨性结构完成后开始计时,至所有钉道准备完毕椎弓根钉置入后结束计时,记录该时间及椎弓根钉数量。最后以各组的总时间除以各组置入椎弓根钉数量即为相应组椎弓根钉置入时间。(2)置钉准确率:术后采用CT扫描评价螺钉置入情况。采用Siemens 64排螺旋CT 1 mm间隔薄层扫描和三维重建图像来判断,由2名放射科医师独立评价。螺钉位置评估分为螺钉完全在椎弓根内和穿出椎弓根皮质。准确率(%)=完全在椎弓根内螺钉数量/椎弓根螺钉总数量×100%。(3)记录是否引起神经、血管及内脏损伤。

对两组患者置钉时间、置钉准确率、神经血管内脏损伤发生情况进行比较分析。

1.4 统计学处理 采用SPSS 13.0统计软件包进行分析,计量资料采用 $\bar{x}\pm s$ 表示,组间置钉时间比较采用单因素方差分析,组间性别、置钉准确率比较使用 $\chi^2$ 检验,组间年龄、Cobb角、脊柱侧凸类型比较采用 $t$ 检验。检验水准( $\alpha$ )为0.05。

## 2 结果

2.1 两组患者椎弓根螺钉置钉时间 3D打印组患者的置钉时间为(2.1±0.4)min,对照组患者的置钉时间为(3.1±0.5)min,两组差异有统计学意义( $t=8.206, P<0.01$ )。

2.2 两组患者椎弓根螺钉置钉准确率 3D打印组23例患者,共置钉354枚,准确率为93.2%(330/354)。对照组30例患者,共置钉466枚,准确率为85.6%(399/466)。置钉准确率两组间差异有统计学意义( $\chi^2=11.77, P<0.01$ )。

2.3 两组患者椎弓根旁神经血管内脏损伤情况 3D打印组和对照组均无神经、血管、内脏损伤发生。典型病例检查结果见图1。

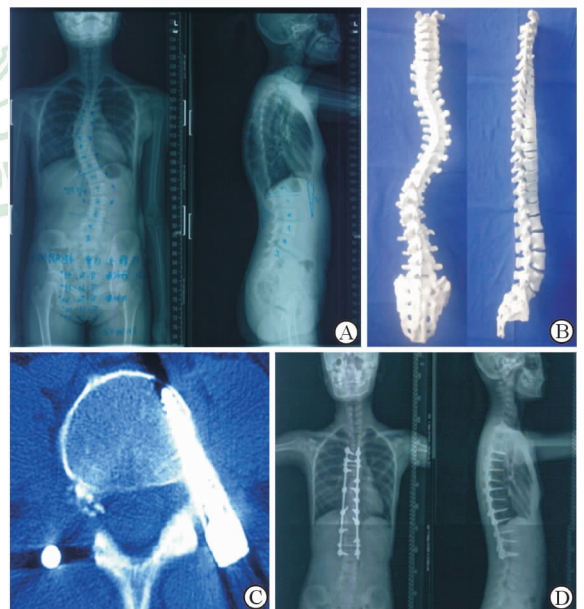


图1 典型病例检查结果

Lenke 1型青少年特发性脊柱侧凸患者,女,17岁,因“发现脊柱畸形2个月”入院手术,没有神经损害症状和体征。A:术前站立正侧位全脊柱X线片,冠状面Cobb角 $T_1\sim T_5$  18°、 $T_5\sim T_{11}$  41°、 $T_{11}\sim L_3$  35°;矢状面Cobb角 $T_5\sim T_{12}$  20°、 $T_{10}\sim L_2$  10°、 $L_1\sim L_5$  37°;B:术前制作的3D打印脊柱模型;C:术后复查CT,尽管患者椎弓根较细,但是椎弓根螺钉的置入位置满意;D:患者术后站立正位和侧位全脊柱X线片,三维矫形效果满意

### 3 讨论

椎弓根螺钉技术广泛应用于脊柱外科,是目前应用最广范的脊柱后路内固定技术。该技术的安全性越来越引起人们的重视。既往文献报道,椎弓根钉置入失误率高达20.0%~39.8%,其中多数没有症状,只有少数导致神经、血管损伤<sup>[6-7]</sup>。而一旦出现神经、血管损伤,则会引起较严重的后果,损伤神经可导致患者肢体功能障碍,损伤血管可导致大出血甚至危及生命;另一方面,椎弓根置入失误可使椎弓根结构破坏导致力学稳定性下降,最终导致椎弓根钉松动,内固定失败<sup>[8]</sup>。因此,提高手术精度和降低置钉失败率是脊柱外科医生必须面对的问题。而传统后路脊柱显露技术无法直视椎弓根全部,传统的椎弓根螺钉置入技术依赖于解剖标志的辨识和术者的经验,即使有经验的脊柱外科医生也存在着置入螺钉位置不佳的可能。

为了提高置钉准确性,临床工作者做了多种尝试。目前应用于脊柱侧凸的置钉技术有徒手置钉技术、球形探针置钉技术、X线监视置钉技术、计算机导航辅助置钉技术、机器人辅助置钉技术等。

徒手置钉技术优点有不需要特殊的仪器设备;具有完备的解剖理论根据,可学习性较强;可重复操作,螺钉置入时间短,从而缩短了整个手术时间;在术者解剖关系熟悉及操作熟练的情况下,安全性高。其缺点为操作步骤复杂,存在一定的学习曲线,需要经验积累;对解剖理论要求较高,对个别患者的变异要适度调整进钉点;实际操作过程中很难准确确定进钉点的位置,具有一定的螺钉误置率<sup>[9]</sup>。为了提高置钉准确率,陈克冰等<sup>[10]</sup>采用球形探针技术置入椎弓根螺钉312枚,术后CT扫描显示椎弓根螺钉置入准确率为100%,无一例穿出椎弓根骨皮质。但球形探针技术的确切效果尚未见大宗病例报道证实。

术中X线监视技术提高了椎弓根螺钉置入的准确性<sup>[11]</sup>,已成为临床工作者的共识。但是对脊柱侧凸等复杂的三维脊柱畸形,术中X线透视的效果不佳,不能反映畸形椎体侧凸及旋转畸形。计算机导航系统的应用为椎弓根钉置入提供实时多平面图像,提高了椎弓根钉置入准确率,减少了椎弓根钉置入失误的发生。临床研究结果证实,导航系统的确

提高了椎弓根螺钉置入的准确性<sup>[12-13]</sup>。但随着椎弓根螺钉固定技术的逐渐普及,脊柱外科医生对螺钉置入技术的掌握日趋熟练,采用传统的解剖标志法可以获得很高的成功率,应用导航在精确度方面优势有所减弱<sup>[13]</sup>。张啟维等<sup>[8]</sup>报道,在腰椎椎弓根钉置入内固定手术中,与徒手置钉相比,计算机导航在置钉准确率方面无明显优势,在置钉时间方面明显长于徒手置钉,提示计算机导航对腰椎椎弓根螺钉置入帮助不大。同时导航系统昂贵的设备需要更大的花费、需要更多的人力来执行机器操作,在一定程度上使手术时间更长、增加了术中出血量和术后感染率<sup>[12]</sup>,手术过程中对患者或医护人员造成更高的放射暴露量等,这些缺点也限制了此类技术在临床中更为广泛的应用。

近年来机器人辅助技术开始应用于临床辅助术中置钉。机器人辅助系统包括:(1)1个有部分移动度的可拆卸的圆柱形装置;(2)1个工作站,能够便于术前计划、术中影像资料的获取与注册、运动计算以及机器人移动的实时监测。Marcus等<sup>[14]</sup>在对246篇文献进行筛查后,对机器人辅助和影像学辅助置钉做了回顾性研究,并对置钉准确性、术中放射剂量、手术时长等方面进行了汇总。由于机器人所需的治疗费用高昂,其应用的治疗效果尚未得到确切的验证。

脊柱侧凸的置钉难度远远大于非脊柱畸形的置钉难度。脊柱侧凸患者的脊柱形态复杂多变,具有不确定性,导致椎弓根螺钉置入时的进钉点、内倾角变化各异;而拟固定椎弓根的最窄直径更是无法预测,这进一步加重了椎弓根置入的难度。使置钉困难进一步加重的是,侧凸椎体在矢状轴上发生了旋转,并且长期旋转使椎体在解剖形态学上发生了一系列发育变异,这些变异包括凹侧椎弓根变短变窄、椎管也变形不对称,凹侧椎板宽度通常小于凸侧椎板宽度,脊髓常偏向凹侧,靠近椎弓根<sup>[15]</sup>。上述变异使得椎弓根钉进针点相对于正常椎体在凹侧应更偏外,内倾角更大;在凸侧应更偏内,内倾角更小。由于不同椎体的上述变异程度不一致,即侧凸顶椎最明显,顶椎两端畸形逐渐减轻,导致上述参数变化的程度也不一样,具有椎体特异性<sup>[16]</sup>。最让术者担心的是拟固定椎弓根的最窄直径,尤其是凹侧变异后的椎弓根直径,决定能否使用和使用什么直径的

椎弓根螺钉。如果能对拟固定椎体的上述变异参数有一个较为直观的个性化显示,椎弓根螺钉置入的安全性和成功率将得到提高<sup>[17]</sup>。

三维打印技术是一种快速成型技术,在20世纪80年代首先应用于工程领域。在医学领域的首次应用是在1990年,当时开发者采用该技术把CT扫描获取的颅骨解剖数据成功复制出颅骨解剖模型<sup>[18]</sup>。经过20多年的发展,现已在骨科、口腔种植、神经外科、颌面外科、心胸外科及临床教学、医患沟通中广泛应用<sup>[19-20]</sup>。3D打印技术包括数据采集、数据处理、3D打印3个步骤,每个步骤又有数种方法。本研究采用的3D打印技术方法流程包括:首先获得高分辨率CT扫描的三维图像数据,将CT扫描的DICOM格式的数据导入Mimics软件中,构建出形态曲面,重建三维模型;保存数据格式为STL格式,这种三维重建图形是由近似三角形的“碎片”拼接出来,三维重建模型中三角形“碎片”越多也就是每块三角形“碎片”越小,将使得重建模型越精细,图形越平滑;STL格式的数据是3D打印机所识别的数据,最终采用分层实体制造的方式用3D打印机将模型打印出来。

目前3D打印技术在矫形外科中的应用鲜有报道,因此研究术前3D打印拟手术节段的脊柱模型辅助置钉的临床效果具有重要临床意义。3D打印技术利用CT重建的三维数字模型,通过3D打印机打印出拟手术节段的脊柱模型,从而获得每个病变椎弓根的三维数据,明确该椎弓根的形态大小、是否适合置钉及置入螺钉的型号,直观显示病变椎弓根的部位、范围及局部解剖情况,并且还可以实现内固定前在模型上模拟置钉,以达到完善术前规划的目的,提高了术者的自信心,缩短了手术时间,提高了置钉准确率。

与徒手技术、球形探针技术相比,3D打印技术为术者提供了更加直观、立体、即时的影像资料,能够增加置钉准确率,缩短置钉时间,减少手术并发症。术中X线监视技术虽然一定程度上能够提高置钉准确率,但是由于术中反复透视,延长了手术时间,增加了患者及术者的射线摄入。并且术中X线监视为二维图像,空间分辨率差,对于复杂的三维畸形来说效果不够确切。计算机导航技术延长了手术时间,增加了出血量和术后感染的发生率,并且术中

要多次透视,增加了患者和术中的放射暴露量,且费用昂贵。与3D打印技术相比,机器人辅助置钉花费高昂,术者的学习曲线较长,目前难以在广大医院推广。

国内Mao等<sup>[21]</sup>最先报道将3D打印应用于脊柱侧凸,但是没有分析其临床效果。最近Yang等<sup>[22]</sup>研究发现,Lenke 1型青少年特发性脊柱侧凸(AIS)患者行后路矫形术前应用3D打印技术能减少手术时间、围手术期出血量和输血量,而手术并发症和术后影像学结果与徒手置钉无明显差别;该研究还发现,对于Cobb角 $>50^\circ$ 的患者,3D打印技术能显著提高置钉准确率。本研究发现3D打印组置钉时间明显缩短、置钉准确性明显提高( $P<0.01$ )。我们分析应该是3D打印模型直观、即时提供的影像信息增加了主刀医生的自信心,结合患者的已有经验,使得置钉时间和准确率提高。并且对于复杂、Cobb角较大的侧凸患者,术前可以在模型上模拟置钉。术中需要注意的是:由于脊柱有一定活动度,体位、麻醉以及术中对竖脊肌剥离等因素会导致侧凸在冠状面、矢状面及轴位旋转上有一定程度改变,因此术前CT检查数据并不能精确反映术中椎体的三维畸形情况,从而导致3D模型不能完全真实反映术中脊柱畸形。椎体的骨性变异不会随患者体位的变化而变化,它是决定进钉点最重要的因素,又以进钉点在横断面上距棘突根部的距离最为重要,术中应以此为参照点。侧凸畸形在术中发生变化对椎弓根钉置入时的内倾角影响最大,在实际操作过程中应严格遵循宁外勿内的原则,在判断可能应用的内倾角范围内尽量选择较小的内倾角。

和其他为提高置钉准确率的技术一样,3D打印技术有其不足之处。首先,所采用患者术前仰卧位CT影像数据,仅反映患者仰卧位时的脊柱形态,而患者手术时为俯卧位并且腹部悬空,其脊柱形态较之仰卧位时不完全一致,导致3D打印模型不能完全真实反映患者手术时的三维空间结构。第二,3D打印数据为术前CT影像资料数据,其精确性取决于CT的分辨率的高低,低分辨率的CT资料会使3D模型与真实的解剖结构存在一定的误差,降低了其空间分辨率。第三,3D打印技术在一定程度上增加了患者的诊疗费用,加重了患者的经济负担。尽管存在局限性,但是3D打印技术确实提高了置钉

准确率、缩短了手术时间,其在脊柱侧凸矫形手术中的应用前景广阔。

### [参考文献]

- [1] Liu T, Hai Y. Sagittal plane analysis of selective posterior thoracic spinal fusion in adolescent idiopathic scoliosis: a comparison study of all pedicle screw and hybrid instrumentation [J]. J Spinal Disord Tech, 2014, 27: 277-282.
- [2] 马胜忠, 李明, 侯铁胜, 倪春鸿. C-D技术治疗青少年特发性脊柱侧凸的并发症及其对策[J]. 中国矫形外科杂志, 2001, 8: 282-283.
- [3] Upendra B N, Meena D, Chowdhury B, Ahmad A, Jayaswal A. Outcome-based classification for assessment of thoracic pedicular screw placement[J]. Spine, 2008, 33: 384-390.
- [4] Rengier F, Mehndiratta A, von Tengg-Kobligk H, Zechmann C M, Unterhinninghofen R, Kauczor H U, et al. 3D printing based on imaging data: review of medical applications[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2010, 5: 335-341.
- [5] Kim Y J, Lenke L G. Thoracic pedicle screw placement: free-hand technique [J]. Neurol India, 2005, 53: 512-519.
- [6] Gertzbein S D, Robbins S E. Accuracy of pedicular screw placement *in vivo* [J]. Spine (Phila Pa 1976), 1990, 15: 11-14.
- [7] Laine T, Makitalo K, Schlenzka D, Tallroth K, Poussa M, Alho A. Accuracy of pedicle screw insertion: a prospective CT study in 30 low back patients[J]. Eur Spine J, 1997, 6: 402-405.
- [8] 张啟维, 张耀南, 孙常太, 徐宏兵. 计算机导航下椎弓根置钉与徒手置钉的对比[J]. 中国组织工程研究, 2013, 17: 1579-1585.
- [9] 许明, 李明. 徒手胸椎椎弓根螺钉置入技术的应用研究[J]. 中国矫形外科杂志, 2006, 14: 781-783.
- [10] 陈克冰, 刘少喻, 李浩森, 梁春祥, 龙厚清, 韩国伟. 球形探针技术在椎弓根螺钉置钉术中的应用[J]. 中华骨科杂志, 2011, 31: 1314-1318.
- [11] Lee S H, Kim K T, Suk K S, Lee J H, Son E S, Kwack Y H. Assessment of pedicle perforation by the cervical pedicle screw placement using plain radiographs: a comparison with computed tomography [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2012, 37: 280-285.
- [12] 邱贵兴. 计算机辅助导航技术在骨科手术中的应用 [J]. 中华骨科杂志, 2006, 26: 651-652.
- [13] 叶斌, 孟祥龙, 刘玉增, 海涌. 徒手置钉技术在脊柱畸形矫正中的准确性与安全性研究[J]. 脊柱外科杂志, 2014, 12: 25-34.
- [14] Marcus H J, Cundy T P, Nandi D, Yang G Z, Darzi A. Robot-assisted and fluoroscopy-guided pedicle screw placement: a systematic review[J]. Eur Spine J, 2014, 23: 291-297.
- [15] Kotwicki T, Napiontek M. Intravertebral deformation in idiopathic scoliosis: a transverse plane computer tomographic study[J]. J Pediatr Orthop, 2008, 28: 225-229.
- [16] 李明, 侯铁胜. 脊柱侧凸三维矫形理论与技术[M]. 上海: 第二军医大学出版社, 2001: 9-31.
- [17] 吴宏斌, 郑启新, 杨述华, 邵增务, 杜靖远. 术前CT测量椎体变异对特发性脊柱侧弯矫形手术的意义[J]. 中国矫形外科杂志, 2009, 17: 68-70.
- [18] Mankovich N J, Cheeseman A M, Stoker N G. The display of three-dimensional anatomy with stereolithographic models[J]. J Digit Imaging, 1990, 3: 200-203.
- [19] Dankowski R, Baszko A, Sutherland M, Firek L, Kamucki P, Wróblewska K, et al. 3D heart model printing for preparation of percutaneous structural interventions: description of the technology and case report[J]. Kardiol Pol, 2014, 72: 546-551.
- [20] Bustamante S, Bose S, Bishop P, Klatte R, Norris F. Novel application of rapid prototyping for simulation of bronchoscopic anatomy [J]. J Cardiothorac Vasc Anesth, 2014, 28: 1122-1125.
- [21] Mao K, Wang Y, Xiao S, Liu Z, Zhang Y, Zhang X. Clinical application of computer-designed polystyrene models in complex severe spinal deformities: a pilot study[J]. Eur Spine J, 2010, 19: 797-802.
- [22] Yang M, Li C, Li Y, Zhao Y, Wei X, Zhang G, et al. Application of 3D rapid prototyping technology in posterior corrective surgery for lenke I adolescent idiopathic scoliosis patients[J]. Medicine (Baltimore), 2015, 94: E582-E589.