

3D 打印定制钛合金融合器在先天性颈椎侧凸畸形治疗中的应用

夏 天, 孙 宇, 赵衍斌, 陈 欣, 周非非, 刁垠泽, 潘胜发

(北京大学第三医院骨科 脊柱疾病研究北京市重点实验室 骨与关节精准医学教育部工程中心 100191 北京市)

【摘要】目的:探讨凹侧撑开技术治疗先天性颈椎侧凸畸形时应用 3D 打印定制钛合金融合器填充椎间隙的可行性和安全性,并评价其初步疗效。**方法:**2019 年 7 月~2020 年 1 月,应用一期前后联合入路凹侧撑开、3D 打印定制钛合金融合器填充椎间隙治疗 7 例先天性颈椎侧凸畸形患者,男 4 例,女 3 例;年龄 6~15 岁(9.0 ± 3.0 岁)。5 例主要骨性畸形为 Klippel-Feil 综合征,1 例为寰椎左侧侧块发育不良,1 例为 C4 节段右侧半椎体。记录手术时间、术中出血量和围手术期神经、血管损伤及切口并发症,观察患者外观和影像学矫正效果。**结果:**7 例患者均顺利完成手术。6 例患者行单侧单处撑开,1 例患者接受单侧双节段撑开。手术时间 326~756min (502.4 ± 149.8 min),术中失血量 100~600ml (341.4 ± 205.0 ml)。椎体间隙使用融合器高度为 5~10mm (8.0 ± 1.8 mm),小关节间隙使用融合器高度 7~12mm (9.5 ± 1.9 mm)。所有患者均无术中并发症发生。3 例患者术后出现神经根功能障碍,均表现为单侧 C5 神经根功能障碍,其中 2 例为凹侧,给予营养神经及功能锻炼治疗,2~6 周肌力自行恢复;1 例在凸侧,经术后 CT 检查发现螺钉位置不佳,行翻修手术调整螺钉位置后肌力恢复。随访 7~13 个月 (10.6 ± 2.5 个月),末次随访时斜颈得到明显纠正,动力位 X 线片及 CT 检查示 3D 打印定制钛合金融合器与软骨下皮质骨之间接触紧密,未见透亮带,未见融合器位移和下沉;内固定位置均良好,无松动和移位,无假关节形成;畸形矫正率为 64.45%。**结论:**应用凹侧撑开技术治疗先天性颈椎侧凸畸形时采用 3D 打印定制钛合金融合器填充椎间隙具有较好的可行性和安全性,短期临床随访结果满意。

【关键词】先天性颈椎侧凸;3D 打印;钛合金融合器;凹侧撑开技术

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2020.09.04

中图分类号:R687.3,R318.1 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2020)-09-0791-06

The application of 3D printed customized titanium alloy cage in the treatment of congenital cervical scoliosis/XIA Tian, SUN Yu, ZHAO Yanbin, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2020, 30 (9): 791-796

【Abstract】Objectives: To explore the safety, feasibility, and short-term outcome of applying 3D printed customized titanium alloy cage into intervertebral space, in the surgical treatment of patients with congenital cervical scoliosis. **Methods:** Between July 2019 and January 2020, seven patients with congenital cervical scoliosis underwent distraction technique of concave side and treated with 3D printed customized titanium alloy cage. 4 were males and 3 were females. Age ranged between 6-15 years old (9.0 ± 3.0 years old). The primary cervical spine deformity was Klippel-Feil syndrome in 5 cases. Of the other two cases, 1 was with malplasia of left lateral mass in the atlas, and the other was diagnosed with C4 right hemi-vertebra. The duration of surgery, estimated blood loss, perioperative neurological, vascular and wound related complications were recorded. Preoperative and postoperative appearance and radiology were observed and compared. **Results:** All patients' surgeries were completed successfully. 6 patients received single site distraction and 1 patient received distraction in two sites. The duration of surgery ranged between 326-756min (502.4 ± 149.8 min), and the estimated blood loss ranged between 100-600ml (341.4 ± 205.0 ml). The height of 3D printed cage applied in the anterior column was 5-10mm (8.0 ± 1.8 mm), and the height of that applied between the facet joint was 7-

基金项目:首都临床特色应用研究与成果推广项目(编号:Z161100000516004)

第一作者简介:男(1988-),主治医师,医学博士,研究方向:颈椎疾病

电话:(010)82267009 E-mail:anthem0316@163.com

通讯作者:孙宇 E-mail:sunyur@vip.sina.com

12mm(9.5 ± 1.9 mm). No intraoperative complication occurred. 3 patients developed C5 nerve root dysfunction after surgery, with 2 patients on the concave side, and the other on the convex side. In 1 patient, revision surgery for screw adjustment was needed, and got fully recovered after revision surgery, and the other 2 patients recovered by conservative treatment. The follow-up period was 7–13 months(10.6 ± 2.5 months). During the last follow-up, the cervical scoliosis in all patients was corrected significantly. Dynamic X-ray and CT scan showed intact binding between 3D printed cage and cortex. No translucent zone, subsidence, loosening, or migration of prosthesis was discovered. No pseudoarthrosis was discovered. The correction rate was 64.45%.

Conclusions: The application of 3D printed customized titanium alloy cage in the treatment of congenital cervical scoliosis was with good feasibility and clinical safety. Short-term follow-up showed excellent results with a promising future.

[Key words] Congenital cervical scoliosis; 3D printing; Titanium alloy cage; Concave side distraction

[Author's address] Department of Orthopaedics, Peking University Third Hospital, Key Laboratory of Spinal Disease Research, Engineering Research Center of Bone and Joint Precision Medicine, Ministry of Education, Beijing, 100191, China

先天性颈椎侧凸畸形是指出生时就存在的由于骨骼发育异常所致的颈椎侧凸,其外观表现为斜颈,又称为骨性斜颈。最常见的先天性发育异常包括 Klippel-Feil 综合征、半椎体畸形、椎体纵裂畸形(蝴蝶椎)以及其他骨性结构的异常^[1,2]。保守治疗通常无效,随着患者的生长发育畸形愈加明显,影响头面部的对称发育,造成脸部外观明显偏斜;严重的畸形还可以导致神经功能障碍。手术是唯一有效的治疗方法。实践证明,半椎体生长阻滞术矫形效果不明显,而应用凸侧截骨、半椎体切除术则可以获得较好的治疗效果^[3,4]。但是颈椎半椎体切除术不仅难度大、风险高,而且费时、费力,对于手术团队的技术、体力和精力都是极大的考验。我院自 2015 年开始应用凹侧撑开技术替代凸侧截骨治疗先天性颈椎侧凸畸形,获得了较好效果。该技术通过凹侧顶点所在的椎间隙或相邻椎间隙撑开,延长凹侧颈椎,达到矫形的目的;无需对凸侧进行大幅度的短缩即可获得充分的矫形。凹侧撑开的关键技术之一是在撑开了的凹侧椎体间隙内及小关节间隙内置入融合器以维持撑开状态直至融合,但是由于患者年龄小,且存在骨骼发育异常,椎间隙的形态及高度均与正常人群存在较大差异,在早期病例中,我们只能采取将成品聚醚醚酮(polyetheretherketone,PEEK)颈椎融合器进行打磨切削成形,再将填充有自体髂骨松质骨的融合器置入撑开的椎体间隙和小关节间隙内,不仅增加了手术时间,而且难以保证打磨成形的融合器表面能够与骨面相吻合。随着 3D 打印技术的成熟,从 2019 年 7 月开始我们将 3D 打印定制微孔钛金属融合器应用于凹侧撑开技术中,治疗先

天性颈椎侧凸畸形,回顾性分析其可行性和安全性,并评价其初步疗效。

1 资料与方法

1.1 一般资料

2019 年 7 月~2020 年 1 月,在我院骨科因先天性颈椎侧凸畸形接受凹侧撑开技术行斜颈矫正、并采用 3D 打印定制钛合金融合器的患者共 7 例,男 4 例,女 3 例;年龄 6~15 岁(9.0 ± 3.0 岁)。其中 5 例主要骨性畸形为 Klippel-Feil 综合征,1 例为寰椎左侧侧块发育不良,1 例为 C4 节段右侧半椎体。在术前及术后随访时手术医生与患者本人及家属进行详细沟通,使其明确手术方式、步骤、目的及利弊,并告知其医学资料将用于研究,征得患者及家属同意并签署知情同意书。

1.2 手术方法

1.2.1 术前准备 术前常规完善颈椎正、侧、过伸过屈侧位 X 线片,全脊柱正侧位 X 线片,颈椎 MRI,颈椎 CT 平扫+三维重建,颈部 CT 血管成像(CTA)。根据 CT 扫描数据制作 1:1 的颈椎 3D 打印模型。术前在颈椎 CT 冠状位确定撑开节段(通常选取为侧凸顶点所对应椎间隙,或椎体相邻椎间隙)。通过术前 3D 建模模拟术中撑开情况及高度,并根据撑开间隙以及相邻上、下终板形态定制 3D 打印钛合金融合器(钛合金微孔金属材质),并制作若干不同高度的融合器以备术中使用。结合影像学资料及计划在模型上画出截骨区域以及入钉点,并将 3D 打印定制钛合金融合器以及模型灭菌备用。

1.2.2 手术操作 手术均由同一术者主刀完成。

先行前路松解及截骨。全身麻醉,气管内插管。右侧常规 Smith-Robinson 入路到达椎前。C 型臂 X 线机透视定位。用刮匙、髓核钳切除手术节段残留椎间盘及软骨板,骨膜下剥离并松解颈长肌至钩椎关节外侧。按术前计划沿残余椎体间隙或融合残迹向凸侧切除残余软组织或骨性结构,并刮除相应节段上、下生长骺板,直至钩椎关节外侧。松解后纵韧带。如果楔形椎左右两侧高度差过大,为减少撑开幅度,则根据术前设计在导航引导下行凸侧部分楔形截骨。前方松解满意后,放置引流,关闭切口。再行后路矫形、固定融合术。颈部在严密保护下翻身置于碳素床上,Mayfield 支架固定头部。颈后正中入路,显露椎板、双侧全部侧块和小关节。前方截骨者按计划切除后方相应部分椎板及小关节。在拟撑开的上、下相邻节段在导航引导下置入椎弓根螺钉,安放固定棒。结合台下同步旋转牵引 Mayfield 头架,台上椎弓根螺钉凹侧撑开。彻底清除关节突软骨并将软骨下皮质骨粗糙化。根据撑开程度选择合适规格的 3D 打印定制钛合金融合器,放置于上、下关节突之间,并确保融合器与关节突软骨下皮质骨紧密接触。透视确认位置满意后,钉-棒系统锁紧,完成矫形。同种异体骨围绕 3D 打印定制钛合金融合器行关节突、侧块和椎板间植骨,放置引流,关闭伤口。最后行前路固定融合术。仰卧位,拆除颈前缝合线,彻底清除相邻椎体上下软骨板并将软骨下皮质骨粗糙化。将合适规格的 3D 打印定制钛合金融合器

置入椎间隙撑开一侧,并确保融合器与椎体软骨下皮质骨紧密接触,安放钛板,放置引流,关闭切口。

1.2.3 术后管理 充分镇痛、常规预防感染。伤口引流量<50ml/24h 后拔除引流管。术后若无明显不适可以离床活动,无需颈托制动。术后 6 周内外出活动时围领保护。

1.3 评估指标

记录手术时间、术中失血量以及神经根、脊髓、椎动脉、硬膜囊损伤以及切口相关并发症。在术前、术后末次随访时的冠状位 CT 片上测量颈椎侧凸 Cobb 角,矫正率=(术前 Cobb 角-术后 Cobb 角)/术前 Cobb 角×100%。末次随访时在 CT 平扫、矢状面和冠状面重建片上观察 3D 打印定制钛合金融合器与软骨下皮质骨之间的接触情况、融合器位移和下沉情况;X 线正侧位、过屈过伸侧位片观察内固定有无松动、移位情况。

2 结果

患者均顺利完成手术,6 例患者行单侧单处撑开,1 例患者接受单侧双节段撑开。椎体间隙使用融合器高度为 5~10mm(8.0±1.8mm);小关节间隙使用融合器高度为 7~12mm(9.5±1.9mm)。2 例行凸侧截骨加压(表 1)。手术时间 326~756min(502.4±149.8min),术中失血量 100~600ml(341.4±205.0ml)。末次随访时矫正率为 49.62%~94.41%(平均 64.45%)。所有患者均无术中并发症

表 1 患者基本资料

Table 1 General demographics of patients

编号 No.	年龄(岁) Age(years)	性别 Gender	颈椎主要结构畸形 Primary cervical deformity	撑开节段 Distraction site	融合器高度(mm) Height of cage		凸侧截骨加压 Osteotomy on concave side
					椎体间隙 Intervertebral	小关节间隙 Facet joint	
1	9	男 Male	C4 楔形椎 C4 wedge-shaped vertebrae	C5-6	6	10	否 No
2	10	女 Female	Klippel-Feil 综合征 Klippel-Feil Syndrome	C4-5	9	9	否 No
3	15	男 Male	Klippel-Feil 综合征 Klippel-Feil Syndrome	C3-5 ^①	10	8	是 Yes
4	7	男 Male	C1 左侧发育不良 Left lateral mass dysplasia of atlas	C3-4	5		否 No
5	6	女 Female	Klippel-Feil 综合征 Klippel-Feil Syndrome	C5-6	9	11	否 No
6	9	女 Female	Klippel-Feil 综合征 Klippel-Feil Syndrome	C4-6 ^②	7	7	是 Yes
7	7	男 Male	Klippel-Feil 综合征 Klippel-Feil Syndrome	C0-2 ^③ C7-T1	C0-2 9 C7-T1 9	C0-2 12 C7-T1 12	否 No

注:①C4 半椎体畸形;②C5 半椎体畸形;③C1 侧块未发育

Note: ①Hemivertebrae of C4; ②Hemivertebrae of C5; ③Lateral mass dysplasia of atlas

发生。3 例患者术后出现神经根功能障碍,均表现为单侧 C5 神经根功能障碍,其中 2 例为凹侧,给予营养神经及功能锻炼治疗,2~6 周肌力自行恢复;另外 1 例发生在凸侧,经术后 CT 发现螺钉位置不佳,行翻修手术调整螺钉位置后肌力恢复。随访 7~13 个月(10.6 ± 2.5 个月),末次随访时,斜颈畸形明显改善,动力位 X 线及 CT 检查显示 3D 打印定制钛合金融合器与软骨下皮质骨之间接触紧密,未见透亮带,未见融合器位移和下沉,内固定位置均良好,无松动和移位,无假关节形成。

3 典型病例

患儿女性,9 岁,发现斜颈 9 年,头部向左侧倾斜,并存在面部不对称,右侧眉弓高于左侧,眼裂右侧高于左侧,左侧颜面部较对侧欠饱满(图 1a),无伴随神经功能障碍。术前影像学显示 C5、T5 右侧半椎体畸形,C2-3 分隔不全,T3 蝴蝶椎(图 1b)。术前颈椎侧凸 Cobb 角 26.1° ,胸椎无明显侧凸畸形(图 1c)。电脑设计采用前路 C4/5(右侧)及 C4/6(左侧)椎间盘切除;后路右侧 C4/5 关节突截骨,左侧 C4/6 小关节松解、撑开,关节突间隙置入 3D 打印定制钛合金融合器;前路 C4/6 左侧椎间隙置入 3D 打印定制钛合金融合器(图 1d~i),术中持续电生理监测。手术时间 402min,术中失血 100ml。术后 1d 诉左侧抬臂困难,查体三角肌肌力 3 级,余四肢肌力正常,予脱水剂、激素、止痛药等治疗,辅以三角肌肌力锻炼,术后 6 周恢复正常。术后 3 个月复查 X 线片显示颈椎侧凸得到明显矫正(图 1j),Cobb 角为 10.4° ,头面部较前明显端正(图 1k)。术后 3 个月颈椎 CT 显示融合器位置良好,未见松动、移位及下沉征象(图 1l,m)。

4 讨论

先天性颈椎侧凸是由于颈椎骨性结构发育异常所导致的颈椎侧凸,通常为散发病例,表现形式多种多样。其发生率约为 $1/40000\sim 1/42000$ ^[5,6]。在出生时多不明显,随着小儿的生长发育,斜颈逐渐加重,表现为固定性斜颈。由于面部受到的牵张力不一致,致使面部发育不对称。严重者亦会发生颈胸段或胸椎代偿性侧凸,进一步出现双肩不等高、双侧肩胛冈不对称等。除影响外观,部分病例存在神经功能障碍外,亦会对患儿的社会活动造成严重影响^[3]。

我们最初对于骨性斜颈的治疗主要通过前后路联合手术,切除半椎体畸形或楔形椎畸形,通过短缩凸侧,以达到矫形的目的^[3,4]。但是在 C6 节段及以上,由于椎动脉的存在增加了颈椎截骨的难度及风险。而且该类疾病患者伴有椎动脉走行异常的几率较高^[7,8],更加增大了手术的难度及风险。凸侧截骨楔形椎切除加压可能导致医源性椎间孔狭窄,增加术后相应节段神经根麻痹的发生率^[3];短缩凸侧还可能进一步加重患者本就存在的短颈畸形,不利于外观的恢复。

本研究中 7 例患者均采用短节段凹侧撑开技术进行矫形,明显降低了手术难度,尽量弥补了患者先天解剖结构的不足,并尽量保留患者的正常运动节段,利于患者日后的生长及发育。而且术后发生凸侧神经根麻痹发生率较低(1 例因螺钉位置不佳所致)。在早期随访中取得了良好的疗效,维持了 64.45%的矫正率。

由于导致斜颈畸形的主要病理基础是楔形椎或者不对称的蝶形椎,因此上下相邻椎体终板也存在畸形。除了其终板形态不规则以外,终板也不平行。即使凹侧撑开以后,也难以做到相邻椎体终板平行。若使用传统 PEEK 材质椎间融合器,则必须采用高速磨钻进行打磨,以尽量贴合上下终板。这个操作过程不仅增加了手术时间,更难以做到精确化地完成术前规划。近年来,3D 打印多孔结构钛合金支架已经广泛用于骨科各个专业。在脊柱外科中,可以根据患者椎体或者附件结构缺损的具体情况,做到近乎完美地重建脊柱的完整性。3D 打印定制钛合金融合器因为拥有合理的多孔结构,因此有着更好的生物力学基础。同时由于其表面相对粗糙,与骨组织间的摩擦力大,因而降低了融合器移位的风险。不仅大大简化了手术步骤,而且显著提高了融合器的稳定性,保证了矫正效果。

在用短节段凹侧撑开技术进行骨性颈椎侧凸畸形矫正时,在以下环节需要注意:①由于骨性斜颈患者中椎动脉变异高发,术前应常规完善颈部动脉 CTA,明确椎动脉的走行是否存在异常,是否会对凹侧撑开及假体的位置产生干扰。本组 7 例患者以及结合既往行凹侧撑开技术的经验,术中无椎动脉损伤发生,没有因撑开而对相应椎动脉的血运造成影响。②在首次前路松解过程中,在处理椎间隙时,应充分刮除上、下椎体相应的生长

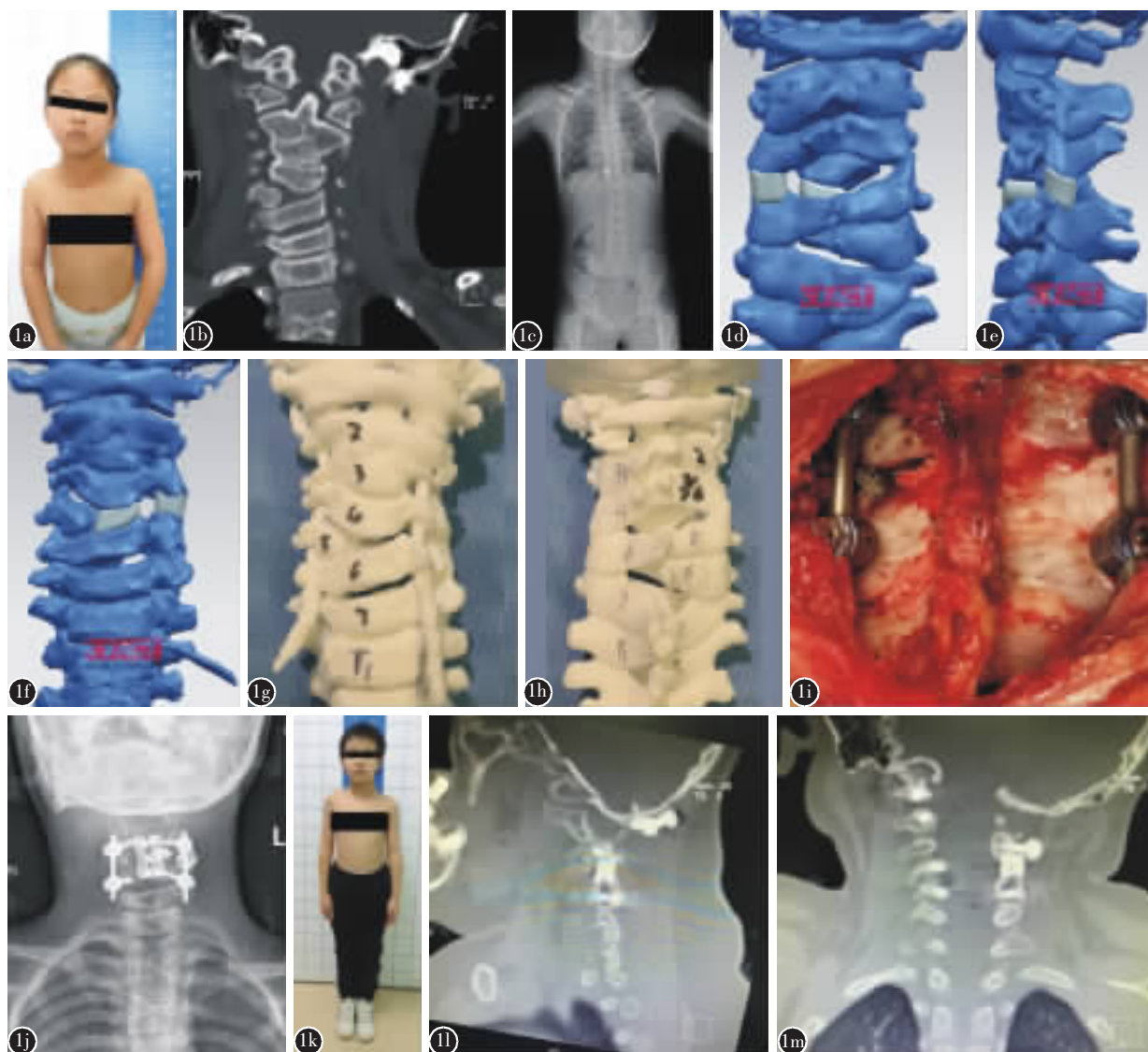


图 1 患儿女性,9 岁 **a** 术前大体照可见斜颈畸形,头向左偏,双目不等高,面部发育轻微不对称 **b** 颈椎 CT 冠状位重建可见 C2-3 分隔不全,C5 右侧半椎体畸形 **c** 全脊柱正位 X 线片可见骨性斜颈畸形,胸椎无明显侧凸畸形 **d-f** 电脑设计凹侧(左侧)撑开,3D 打印定制钛合金融合器置入左侧 C4-C6 小关节间隙和椎体间隙 **g,h** 3D 打印颈椎 CT 模型:C2-C3 分隔不全,C5 右侧半椎体畸形 **i** 术中凹侧(左侧)撑开,3D 打印定制钛合金融合器置入左侧 C4-C6 小关节间隙 **j** 术后 X 线正位片可见左侧 C4-6 椎体及关节突关节间通过凹侧撑开技术置入 3D 打印定制人工融合器 **k** 术后 3 个月随访大体像可见斜颈得到纠正,双眼裂水平 **l,m** 术后 3 个月随访颈椎 CT 矢状位及冠状位可见 3D 打印定制人工融合器位置良好,未见松动、移位及下沉征象

Figure 1 A 9 years old female **a** The figure showed cervical scoliosis, with head tilting towards left side, eyes uneven, and asymmetric appearance of her face **b** Her cervical CT scan coronary view showed unsegment of C2 and C3 vertebrae, and C5 right hemivertebra deformity **c** Whole spine A-P view showed congenital cervical scoliosis, and no significant scoliosis in thoracic region **d-f** Computer designed distraction of concave side(left side) and 3D printed customized titanium alloy cage implanted into left C4-C6 facet space and disc space **g, h** 3D printed CT model. Unsegment of C2 and C3 vertebrae, and C5 right hemivertebra deformity **i** In the operation, distraction of concave side (left side) and 3D printed customized titanium alloy cage implanted into left C4-C6 facet space **j** Post-operative AP view showed 3D printed customized artificial cages implanted in intervertebral space and facet joint of C4-6 segment on the left side **k** 3 months follow-up showed cervical scoliosis was corrected, and her eyes were even **l, m** CT scan of cervical spine at 3 months follow up showed the position of 3D printed customized artificial cages was in-situ, no sign of loosening, migration or subsidence was observed through sagittal and coronary plane

骺板,使得凸侧松质骨间充分接触,凹侧松质骨与钛合金融合器的粗糙界面相接触,保证融合。在处理后方结构时也应充分刮除小关节内软骨,保证前、后方融合,避免半椎体再次生长。③当前路完成松解,翻身进行后路手术时,后方结构仍完整,颈椎稳定性尚可,但仍应在翻身过程中保证轴位翻身,避免造成医源性损伤。④手术应在导航辅助下完成,一方面骨性斜颈患者椎弓根多伴有发育异常,在导航下完成置钉可降低内固定位置不良的发生几率,提高椎弓根螺钉的强度,避免长节段的固定。另一方面通过术前在 3D 打印模型规划截骨位置,术中结合模型以及导航共同完成截骨操作,最大限度地保证了手术能够按照术前计划进行,保证矫形效果。

在并发症方面,本组未出现硬膜撕裂、脊髓损伤、椎动脉损伤等术中并发症。术后 3 例患者出现 C5 根支配的肌力下降,其中 1 例与内固定不良相关,另 2 例患者,均出现在凹侧,经保守治疗后自行缓解。所有神经根症状均发生于 C5 根,其发生机制可能与颈椎后路术后 C5 神经根麻痹相似。由于凹侧的纵向撑开,有可能改变了神经根的走行和张力,神经根受到牵拉,发生局部缺血。

由于钛合金材质在术后常规 CT 扫描中存在大量金属伪影,难以观察融合器内部的融合情况。但是本组病例末次随访的影像学检查中,3D 打印定制钛合金融合器与软骨下皮质骨之间接触紧密,未见透亮带,也未见融合器位移和下沉。内固定位置均良好,无松动和移位,提示 3D 打印定制钛合金融合器可能已经与骨质融合。既往研究显示,多孔结构的钛合金支架可促进前成骨细胞黏附、增殖、分化及矿化^[9,10]。在实验研究中,将多孔 3D 打印钛合金移植物置入体内后,通过微计算机断层扫描技术扫描重建及组织染色均证实可观察到大量骨组织长入置入物内^[10,11]。因此,本研究中采用 3D 打印定制钛合金融合器的患者中,无需髂骨取骨,避免了髂骨取骨相关的如感染、切口渗液、延迟愈合以及长期疼痛等并发症发生的可能性,降低了手术风险,缩短了术后恢复的时间,减轻了患者的痛苦。

综上所述,采用凹侧撑开技术治疗先天性颈

椎侧凸畸形患者时,应用 3D 打印定制钛合金融合器填充椎间隙具有较好的可行性和安全性,可以获得满意的矫形效果,无严重并发症的发生,具有良好的应用前景。但由于病例少见,入组病例较少,且随访时间相对较短,需要不断积累病例数量以及增加随访时间,才能够获得应用 3D 打印定制钛合金融合器治疗先天性颈椎侧凸畸形的中远期效果。

5 参考文献

1. Klimo P Jr, Rao G, Brockmeyer D. Congenital anomalies of the cervical spine[J]. Neurosurg Clin N Am, 2007, 18(3): 463-478.
2. Kumar R, Guinto FC Jr, Madewell JE, et al. The vertebral body: radiographic configurations in various congenital and acquired disorders[J]. Radiographics, 1988, 8(3): 455-485.
3. 孙宇, 张凤山, 潘胜发, 等. 一期前后联合入路截骨矫形治疗先天性颈椎侧凸[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2016, 26(9): 769-776.
4. Yu M, Diao Y, Sun Y, et al. Evaluation of a combined approach to the correction of congenital cervical or cervicotheracic scoliosis[J]. Spine J, 2019, 19(5): 803-815.
5. Tracy MR, Dormans JP, Kusumi K. Klippel-Feil syndrome: clinical features and current understanding of etiology[J]. Clin Orthop Relat Res, 2004, 424: 183-190.
6. Tredwell SJ, Smith DF, Macleod PJ, et al. Cervical spine anomalies in fetal alcohol syndrome[J]. Spine(Phila Pa 1976), 1982, 7(4): 331-334.
7. 王圣林, 王超, 刘溢, 等. 寰椎枕骨化畸形患者的椎动脉走行[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2009, 19(4): 246-249.
8. Wang S, Wang C, Liu Y, et al. Anomalous vertebral artery in craniovertebral junction with occipitalization of the atlas [J]. Spine(Phila Pa 1976), 2009, 34(26): 2838-2842.
9. Nune KC, Misra RD, Gaytan SM, et al. Interplay between cellular activity and three-dimensional scaffold-cell constructs with different foam structure processed by electron beam melting[J]. J Biomed Mater Res A, 2015, 103(5): 1677-1692.
10. 郑扬, 李危石, 刘忠军. 骨组织 3D 打印: 骨再生的未来[J]. 北京大学学报(医学版), 2015, 47(2): 203-206.
11. Yang J, Cai H, Lv J, et al. In vivo study of a self-stabilizing artificial vertebral body fabricated by electron beam melting[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2014, 39(8): E486-492.

(收稿日期:2020-05-10 末次修回日期:2020-08-03)

(英文编审 谭 啸)

(本文编辑 卢庆霞)