

· 临床研究 ·

基于计算机辅助设计与 3D 打印技术辅助的新型横突拉钩的研制和临床应用

刘涛¹, 牛国旗¹, 周功¹, 刘路坦¹, 聂虎²

(1.蚌埠医学院第二附属医院骨科, 安徽 蚌埠 233002; 2.蚌埠医学院数字骨科重点实验室, 安徽 蚌埠 233002)

【摘要】 目的: 利用计算机辅助设计 (computer-aided design, CAD) 结合 3D 打印技术辅助研制新型横突拉钩并探讨其临床应用效果。方法: 利用 CAD 结合 3D 打印技术辅助设计研制新型横突拉钩。自 2018 年 9 月至 2019 年 9 月, 将新型横突拉钩应用于临床, 对 60 例需行椎弓根螺钉固定并椎间融合器植骨方式治疗的腰椎单节段病变患者, 根据是否应用新型横突拉钩分为新型横突拉钩组和对照组, 每组 30 例。新型横突拉钩组男 14 例, 女 16 例; 年龄 (68.0±4.3) 岁; L_{3,4} 8 例, L_{4,5} 9 例, L₅S₁ 13 例; 腰椎间盘突出 5 例, 腰椎管狭窄 20 例, 退变性腰椎滑脱 5 例; 使用新型横突拉钩进行椎弓根螺钉置入。对照组男 15 例, 女 15 例; 年龄 (69.2±4.5) 岁; L_{3,4} 8 例, L_{4,5} 10 例, L₅S₁ 12 例; 腰椎间盘突出 5 例, 腰椎管狭窄 21 例, 退变性腰椎滑脱 4 例; 使用传统的椎板拉钩进行软组织的牵开及徒手椎弓根螺钉的置入。比较两组患者手术切口长度、置入单枚螺钉时间、透视次数、定位针或螺钉调整次数以及术后 72 h 手术切口疼痛视觉模拟评分 (visual analogue scale, VAS)。结果: 利用 CAD 结合 3D 打印技术快速研制出了一种新型横突拉钩。新型横突拉钩组手术切口长度、置入单枚螺钉时间、透视次数、定位针或螺钉调整次数均小于对照组 ($P < 0.05$)。术后 72 h 手术切口疼痛 VAS, 两组比较差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。结论: 利用 CAD 结合 3D 打印技术研制新型横突拉钩, 具有设计方便、研制周期短、成本低等优点, 为新型医疗器械的研发提供了一种新的思路, 新型横突拉钩具有术中操作简便、固定可靠、对椎旁肌损伤小、方便椎弓根螺钉置入、减少术中透视次数等优点。

【关键词】 计算机辅助设计; 打印, 三维; 腰椎; 椎弓根钉

中图分类号: R608

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.2022.05.009

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID)



Development and clinical application of a new transverse process retractor based on computer-aided design and 3D printing technology LIU Tao, NIU Guo-qi*, ZHOU Gong, LIU Lu-tan, and NIE Hu. *Department of Orthopaedics, the Second Affiliated Hospital of Bengbu Medical College, Bengbu 233002, Anhui, China

ABSTRACT **Objectives:** To manufacture a new type of transverse process retractor by using computer-aided design (CAD) combined with 3D printing technology and investigate its clinical application effect. **Methods:** A new type of transverse protrusion retractor was developed by CAD combined with 3D printing technology. From September 2018 to September 2019, the new transverse process retractor was applied in clinic. Sixty patients with lumbar single segment lesions who needed treatment by pedicle screw fixation, bone grafting and interbody fusion were divided into new transverse process retractor group and control group, with 30 cases in each group. There were 14 males and 16 females in new type transverse process retractor group, the age was (68.0±4.3) years old on average; lesion segment of 8 cases were L_{3,4}, 9 cases were L_{4,5}, 13 cases were L₅S₁; 5 cases of lumbar disc herniation, 20 cases of lumbar spinal stenosis, 5 cases of degenerative lumbar spondylolisthesis; new transverse process retractor was used to pedicle screw placement. While there were 15 males and 15 females in control group, with an average age of (69.2±4.5) years old; lesion segment of 8 cases were L_{3,4}, 10 cases were L_{4,5}, 12 cases were L₅S₁; 5 cases of lumbar disc herniation, 21 cases of lumbar spinal stenosis, 4 cases of degenerative lumbar spondylolisthesis; the traditional lamina retractor was used for soft tissue pulling and finished pedicle screw placement by freehand. The length of surgical incision, the time required for inserting a single screw, fluoroscopy times, the times of adjusting the positioning needle or screw in insertion process, and the visual analogue scale (VAS) of surgical incision 72 hours after operation were compared between two groups. **Results:** Using CAD and 3D printing technology, a new type of transverse protrusion retractor was developed quickly. The

基金项目: 蚌埠医学院自然科学基金面上项目 (编号: BYKY18152); 蚌埠医学院数字骨科技术研发与应用创新团队项目 (编号: BYKC201911)

Fund program: Natural Science Foundation of Bengbu Medical College (No. BYKY18152)

通讯作者: 牛国旗 E-mail: ssngq@163.com

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

length of surgical incision, the time required for inserting a single screw, fluoroscopy time, and the times of adjusting the positioning needle or screw in insertion process in new transverse process retractor group were less than those in control group ($P < 0.05$). There was no significant difference in VAS of lumbar incision pain at 72 hours after operation between two groups ($P > 0.05$). **Conclusion:** Using CAD combined with 3D printing technology to develop a new transverse protrusion retractor has the advantages of convenient design, short development cycle and low cost. It provides a new idea for the research and development of new medical devices. The new transverse process retractor has the advantages of easy operation, reliable fixation, less damage to paravertebral muscle, convenient pedicle screw placement, reducing fluoroscopy time and so on.

KEYWORDS Computer-aided design; Printing, three-dimensional; Lumbar vertebrae; Pedicle screws

腰椎椎弓根螺钉内固定技术是脊柱外科中最常用的技术之一，其被广泛应用于腰椎肿瘤、腰椎骨折、脊柱畸形及腰椎退变性疾病的手术治疗中^[1-3]。在进行腰椎椎弓根螺钉内固定手术时，由于腰背部软组织较厚，术区显露较为困难。而椎弓根螺钉的置入有一定的失误率，如螺钉置入位置不佳，可引起内固定失效甚至损伤血管、神经及内脏的严重并发症^[4-5]。如何借助各种拉钩有效的牵开软组织，同时快速、准确的置入椎弓根螺钉，一直是脊柱外科医师备受关注的问题。本课题组在经过对不同患者腰椎的骨骼模型和腰背部软组织厚度进行观察、测量的基础上，运用计算机辅助设计（computer-aided design, CAD）结合 3D 打印技术设计制作了一种以腰椎横突为固定支点，同时合并有椎弓根螺钉置入导向通道的新型横突拉钩，获得了国家实用新型专利（专利号：ZL 2018 2 1729099.9）。本文对 2018 年 9 月至 2019 年 9 月采用椎弓根螺钉固定并椎间融合器植骨方式治疗的 60 例腰椎单节段病变患者的临床资料进行回顾性分析，评价新型横突拉钩在椎弓根螺钉置入过程中的使用效果，并与传统椎弓根螺钉置入方法进行对比分析。

1 资料与方法

1.1 病例选择

纳入标准：经正规保守治疗半年以上临床效果不佳；手术方式采用椎弓根螺钉固定并椎间融合器植骨方式；腰椎单节段病变；无严重系统疾病，能耐受手术。

排除标准：未经过正规保守治疗；腰椎双节段和多节段病变；有严重系统疾病，不能耐受手术。

1.2 一般资料

本组 60 例，根据是否应用新型横突拉钩分为新型横突拉钩组和对照组，每组 30 例。新型横突拉钩组男 14 例，女 16 例；年龄（68.0±4.3）岁；L_{3,4} 8 例，L_{4,5} 9 例，L₅S₁ 13 例；腰椎间盘突出 5 例，腰椎管狭窄 20 例，退变性腰椎滑脱 5 例；使用新型横突拉钩进行椎弓根螺钉置入。对照组男 15 例，女 15 例；年龄（69.2±4.5）岁；L_{3,4} 8 例，L_{4,5} 10 例，L₅S₁ 12 例；腰椎间盘突出 5 例，腰椎管狭窄 21 例，退变性腰椎滑脱 4 例；使用传统的椎板拉钩进行软组织的牵开及徒手椎弓根螺钉的置入。两组患者术前一般资料比较差异无统计学意义（ $P > 0.05$ ），见表 1。

1.3 方法

1.3.1 新型横突拉钩的结构 该拉钩体部设计为“L”形，转折角度为 90°，尾端向上弧形翻转。拉钩的尖端设计成双齿形开口，开口深度为 10 mm，与横突外形高度匹配。其尖端两齿紧贴于上关节突外侧缘、横突的上下方，借助于拉钩尾端的按压，可将拉钩尖端紧紧地嵌在横突上。尖端上翘，与长轴成 20°角。拉钩柄长 200 mm，宽 30 mm，深度 100 mm。同时该拉钩体部下方设计有椎弓根螺钉置入导向通道，通道直径 10 mm（图 1）。新型横突拉钩的实物见图 2。

1.3.2 CAD 建模及 3D 模型打印 根据设计思路用 CAD 软件绘制新型横突拉钩 dwg 格式二维平面图，导入 SolidWorks 软件，设定尺寸后通过对齐、拉伸、切除等命令进行三维建模（见图 3），然后以 STL 格式导出至 3D 打印机打印聚乳酸材质新型横突拉钩模型（见图 4）。收集蚌埠医学院第二附属医院骨科住院患者的腰椎三维 CT 检查数据（128 层薄层

表 1 两组腰椎单节段病变患者术前一般资料比较

Tab.1 Comparison of preoperative general data of patients with lumbar single segment lesions between two groups

组别	例数	年龄 ($\bar{x} \pm s$, 岁)	性别(例)		病变椎间隙(例)			疾病名称(例)		
			男	女	L _{3,4}	L _{4,5}	L ₅ S ₁	腰椎间盘突出	腰椎管狭窄	退变性腰椎滑脱
新型横突拉钩组	30	68.0±4.3	14	16	8	9	13	5	20	5
对照组	30	69.2±4.5	15	15	8	10	12	5	21	4
检验值		$t = -1.002$	$\chi^2 = 0.067$		$\chi^2 = 0.093$			$\chi^2 = 0.136$		
P 值		0.321	0.796		0.955			0.934		

CT), 将 CT 数据转化为 DICOM 格式, 导入 Mimics17.0 (比利时, Materialise 公司) 软件进行三维重建。然后以 STL 格式导出至 Idea Maker 软件, 利用此软件切片后导入 3D 打印机打印 1:1 比例聚乳酸材质腰椎模型(见图 5)。使用 3D 打印的新型横突拉钩模型和 1:1 比例腰椎模型进行体外模拟椎弓根螺钉置入手术, 通过模拟手术来调整新型横突拉钩的外形及各种参数, 最后定型生产出可重复使用的金属材质新型横突拉钩产品。

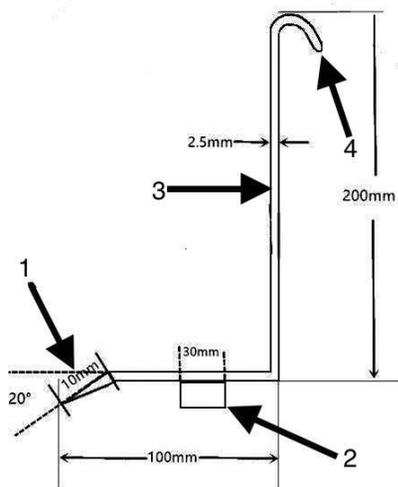


图 1 新型横突拉钩的设计图。1 箭头所指为横突拉钩的双齿形尖端; 2 箭头所指为椎弓根螺钉导向通道; 3 箭头所指为横突拉钩体部; 4 箭头所指为横突拉钩尾部

Fig.1 The design of the new transverse protrusion retractor. The arrow of 1 refers to the double tooth tip of the transverse protrusion retractor. The arrow of 2 indicates the guide channel of pedicle screw. The arrow of 3 indicates the body of the transverse protrusion retractor. The arrow of 4 refers to the tail of the transverse protrusion retractor

1.3.3 手术方法 两组手术操作均由同组医师完成。所有患者采用全麻, 取俯卧位, 以病变节段为中心经棘突做纵行切口, 逐层切开, 沿棘突及椎板表面

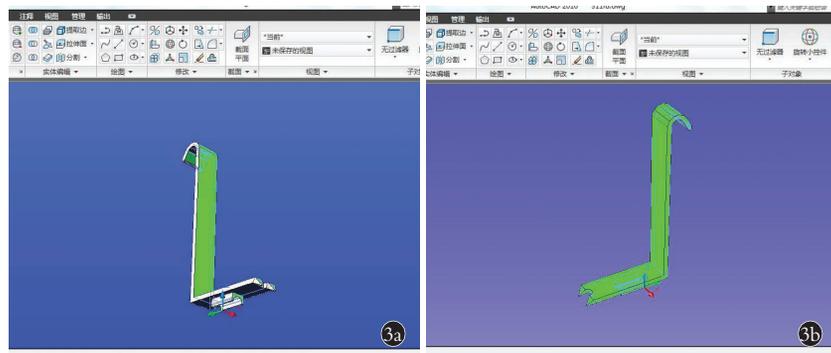


图 3 新型横突拉钩 CAD 软件三维建模图 3a. 斜面观 3b. 透视图

Fig.3 Three dimensional modeling drawing of CAD software for the new transverse protrusion retractor 3a. Oblique view 3b. Perspective view

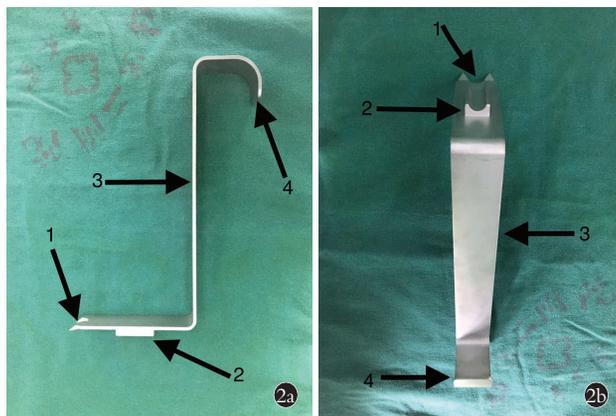


图 2 新型横突拉钩实物。图 1 箭头所指为横突拉钩的双齿形尖端; 2 箭头所指为椎弓根螺钉导向通道; 3 箭头所指为横突拉钩体部; 4 箭头所指为横突拉钩尾部 2a. 侧面观 2b. 俯视图

Fig.2 Entity picture of the new transverse protrusion retractor by front view and side view. The arrow of 1 refers to the double tooth tip of the transverse protrusion retractor. The arrow of 2 indicates the guide channel of pedicle screw. The arrow of 3 indicates the body of the transverse protrusion retractor. The arrow of 4 refers to the tail of the transverse protrusion retractor 2a. Lateral view 2b. Top view

剥离竖脊肌, 暴露椎板、关节突及横突根部。

新型横突拉钩组: 将新型横突拉钩头端的双齿结构骑跨在横突上, 调整拉钩头尾方向, 使拉钩体部与棘突纵轴水平垂直, 则卡齿中心点即在横突中线水平。再根据上关节突外侧缘位置极易确定椎弓根螺钉的进针点及方向, 然后通过拉钩下方体部的椎弓根螺钉置入导向通道进行定位针及椎弓根螺钉的置入(见图 6)。C 形臂 X 线机正侧位透视显示螺钉位置良好后完成置钉。

对照组: 使用传统的椎板拉钩进行软组织的牵开及徒手椎弓根螺钉的置入。C 形臂 X 线机正侧位透视显示螺钉位置良好后完成置钉。

1.4 观察项目与方法

记录两组患者手术切口长度、置入单枚螺钉时间、透视次数、定位针或螺钉调整次数, 采用视觉模拟评分(visual analogue scale, VAS) 对术后 72 h 手术切口疼痛程度进行评价。其中单枚螺钉置入时间计算方法为: 观察组从放置新型横突拉钩到 C 形臂 X 线机正侧位透视显示螺钉位置良好(螺钉完全位于椎弓根内, 没有冲破椎弓根皮质)所需时间。对照组从放置传统椎板拉钩到 C 形臂 X 线机正侧位透视显示螺钉位置良好所需时间。定位针或螺钉调整次数为两组在置



图 4 3D 打印聚乳酸材质新型横突拉钩模型 4a. 侧面观 4b. 俯视图
Fig.4 3D printing polyactic acid (PLA) material new transverse process retractor model 4a. Lateral view 4b. Top view

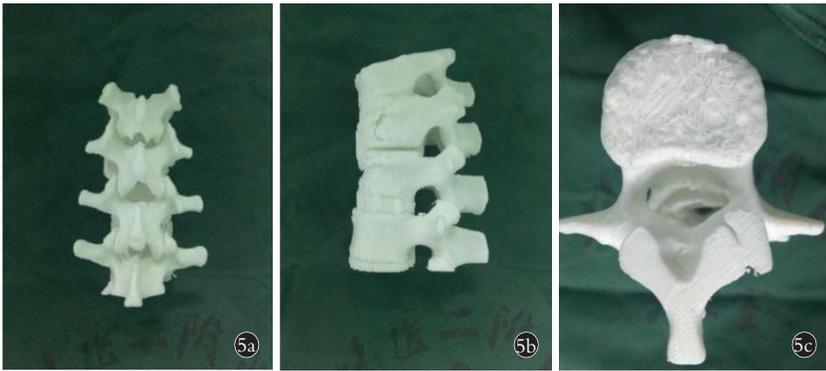


图 5 3D 打印 1:1 比例聚乳酸材质 L₂-L₅ 椎体模型 5a. 正面观 5b. 侧面观 5c. 俯视图
Fig.5 3D printing 1:1 scale polyactic acid (PLA) material L₂-L₅ vertebral body model 5a. Anterior view 5b. Lateral view 5c. Top view

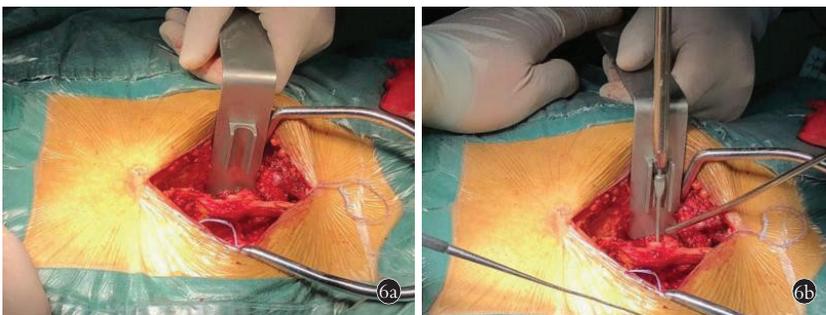


图 6 新型横突拉钩的术中使用 6a. 横突拉钩头端的双齿结构骑跨在横突上, 调整拉钩头尾方向, 使拉钩体部与棘突纵轴水平垂直 6b. 通过拉钩下方体部的椎弓根螺钉置入导向通道进行定位针
Fig.6 Intraoperative use of the new transverse protrusion retractor 6a. The two-tooth structure of the head end of the transverse protrusion retractor mounted on the transverse process, and the direction of the head and tail of the retractor was adjusted to make the retractor body horizontal and vertical to the longitudinal axis of the spinous process 6b. Position the needle by placing the pedicle screw under the retractor into the guide channel

入螺钉过程中根据手感或透视结果不满意时对螺钉进行的调整次数。

1.5 统计学处理

采用 SPSS 22.0 进行统计学分析。两组患者年龄、手术切口长度、置入单枚螺钉时间、透视次数、定位针或螺钉调整次数、术后 72 h 手术切口 VAS 等定量资料以均数±标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示, 采用成组设计定量资料 *t* 检验进行比较。两组性别、病变椎间隙、疾病名称分布等定性资料比较采用 χ^2 检验。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

所有患者顺利完成手术, 切口皮肤无坏死, 切口无感染, 无脊髓或神经根损伤。新型横突拉钩组手术切口长度、置入单枚螺钉时间、透视次数、定位针或螺钉调整次数均小于对照组 ($P < 0.05$)。术后 72 h 手术切口疼痛 VAS, 两组比较差异无统计学意义 ($P > 0.05$), 见表 2。

3 讨论

3.1 新型横突拉钩的设计思路

临床工作中发现无论是腰椎髓核摘除、椎管减压或椎间融合器植骨术, 其附属结构 (如椎板、关节突) 均需要部分或全部切除, 特别是采用经椎间孔腰椎椎间融合术 (transforminal lumbar interbody fusion, TLIF), 要求切除全部关节突及大部分椎板, 而腰椎横突不涉及, 能够获得完整的保留, 且腰椎横突结构恒定, 各腰椎横突外形基本一致, 横突至棘突间间距长, 空间大, 可作为拉钩的支点有效牵开软组织, 充分显露腰椎后方结构。腰椎椎弓根螺钉徒手置钉技术方法较多, 目前临床上最常用的方法有“人”字峰顶点法、Magerl 法、“十”字定位法、Weinstein 法等^[6], 可以看出大多数定位方法均离不开横突和关节突作为定位参考。“十”字定位法以横突横轴中线与上关节突外侧缘纵轴线的交点作为定位点, 定位方法简单方便、易于操作。综上原理, 课题组设计了以横突为固定支点的横突拉钩, 该横突拉钩尖端设计为双齿形, 双齿插入式开口可骑跨于横突上, 双齿中点即为横

表 2 两组腰椎单节段病变患者围手术期相关观察指标比较 ($\bar{x} \pm s$)

Tab.2 Comparison of perioperative observation index of patients with lumbar single segment lesions between two groups ($\bar{x} \pm s$)

组别	例数	手术切口长度 (cm)	置入单枚螺钉时间 (min)	透视次数 (次)	定位针或螺钉调整次数 (次)	术后 72 h 切口 VAS (分)
新型横突拉钩组	30	6.59±0.34	4.20±1.15	5.00±1.25	1.77±1.33	7.80±1.20
对照组	30	6.92±0.20	14.67±2.23	14.46±2.21	4.67±3.27	7.80±1.50
t 值		4.496	22.886	20.522	4.496	0.095
P 值		0	0	0	0	0.924

突中线,利用了“十”字定位法原则,极易确定椎弓根螺钉进针点,结合拉钩体部的椎弓根螺钉置入导向通道,可准确快速置入椎弓根螺钉。

3.2 CAD 结合 3D 打印技术用于医疗器械研发的优势

3D 打印技术的本质是“激光快速成形技术”,又称为“增量技术”“增材技术”,兴起于 20 世纪 80 年代末。3D 打印以数字模型文件为基础,通过 3D 打印机采用分层加工、迭加成型的方式逐层增加材料来生成 3D 实体。3D 打印技术最早应用于模具制造、工业设计等领域,被用于制造模型。随着其技术的发展,现在也逐渐被应用于临床医学领域^[7-9]。3D 打印带来了世界性制造业革命,传统部件设计完全依赖于生产工艺能否实现,而 3D 打印的出现,颠覆了这一生产思路,使得企业在生产部件的时候不再考虑生产工艺问题,任何复杂形状的设计均可通过 3D 打印来实现。3D 打印最突出的优点是无须机械加工或模具,就能直接从计算机图形数据中生成任何形状的物体^[10-12],从而极大地缩短了产品的生产周期,降低了生产成本,提高了生产率。本研究中,使用 CAD 软件设计出新型横突拉钩设计图,经过转换后 3D 打印机可在数小时内快速、精确的打印出拉钩模型。利用 3D 打印的模型进行椎弓根螺钉置入的模拟试验,在试验中发现设计缺陷可不断调整,完善拉钩的外形及各种参数,最后定型生产出可重复使用的金属材料新型横突拉钩产品。由于临床一线医生对于医疗器械的使用感受最深,所以由临床一线医生进行研发的医疗器械也更合理、更符合临床应用。该研发模式将会是一条高效的医疗器械自主设计、研发的途径,值得临床一线医生借鉴^[13]。

3.3 新型横突拉钩的优点

随着腰椎解剖学和生物力学的发展,腰椎后方的肌群在维持腰椎张力与稳定性方面的重要性逐渐被临床工作者所重视。而腰椎后方肌群的损伤可导致腰部顽固性疼痛和功能障碍。国外有报道传统的后路手术方式部分并发症产生与医源性的肌肉组织损伤有直接关系。Kawaguchi 等^[14]首先分析了腰

椎手术中拉钩牵拉力量与椎旁肌的损伤有直接关系。Gejo 等^[15]研究显示腰椎椎旁肌的损伤和拉钩牵拉时间有直接关系,牵拉时间越长,损伤越重。Park 等^[16]认为椎旁肌的损伤会加重脊柱的负荷,加速脊柱运动节段的退变。因而,设计一种较为实用的拉钩,在缩小手术切口、减少软组织损伤的同时对腰椎后方结构进行有效暴露并方便手术显得尤为重要。传统单齿椎板拉钩需固定在关节突关节外侧或横突上,支点单一,术中极易松动,需反复调整椎板拉钩位置和加大拉钩力量,延长了手术时间,对椎旁肌损伤大。新型横突拉钩尖端设计成双齿形开口,与横突外形高度匹配,其尖端两齿紧贴于上关节突外侧缘、横突根部的上下方,无须过多暴露横突,暴露至上关节突外侧缘和横突根部即可,使用较小的力即可将拉钩尖端紧紧地嵌在横突上,固定牢靠,不易松动,缩短了手术时间,减少了对椎旁肌肉的挤压和反复、长时间的牵拉,且相对于传统椎板拉钩不增加出血量。由于新型横突拉钩尖端设计成双齿形开口,使用时骑跨并紧扣横突上下缘,且开口较浅,深度为 10 mm,故不易造成神经根损伤。

腰椎椎弓根螺钉内固定是治疗腰椎肿瘤、腰椎骨折、脊柱畸形及腰椎退变性疾病的有效方法,目前腰椎椎弓根螺钉内固定方法主要有徒手置钉、C 形臂 X 线透视辅助置钉、导航法及个性化辅助导板置钉等^[17-20]。C 形臂 X 线透视辅助置钉需反复进行术中 X 线透视,辐射较大,且要求术者有较高的技术操作和手术经验。导航法置钉和个性化辅助导板置钉准确性较高,但设备昂贵,手术时间长,难以推广。传统的徒手置钉仍是目前最常用的置钉方法,其定位方式均离不开横突和关节突作为定位参考。新型横突拉钩尖端设计为双齿形,双齿插入式开口可骑跨于横突上,双齿中点即为横突中线,利用了“十”字定位法原则,极易确定椎弓根螺钉进针点,结合拉钩体部的椎弓根螺钉置入导向通道,可准确快速置入椎弓根螺钉。

3.4 本研究的不足之处

本研究的不足之处有:(1)能熟练运用 CAD 软

件及 3D 打印技术,对设计人员要求较高。(2)使用新型横突拉钩置入椎弓根螺钉时仍有可能存在误差,尚需术中 C 形臂 X 线机辅助透视。(3)调整定位针或螺钉是通过透视结果来决定,具有一定的主观性。(4)需进一步加大样本量及随访时间来验证新型横突拉钩的优点。

综上所述,使用 CAD 结合 3D 打印技术来辅助新型横突拉钩的研制,相比传统制造过程具有设计方便、研制周期短、成本低等优点,为新型医疗器械的研发提供了一种新的思路。此新型横突拉钩经过临床应用证明具有术中操作简便、固定可靠、对椎旁肌损伤小、方便椎弓根螺钉置入、减少术中透视次数等优点,方便推广使用。

参考文献

- [1] Kasten MD, Rao LA, Priest B. Long-term results of iliac wing fixation below extensive fusions in ambulatory adult patients with spinal disorders[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2010, 23(7):E37-E42.
- [2] Siewe J, Bredow J, Oppermann J, et al. Evaluation of efficacy of a new hybrid fusion device: a randomized, two-centre controlled trial [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2014, 15: 249.
- [3] 龚全,孔清泉,李涛,等. 后路复位技术在重度腰椎滑脱症治疗中的应用[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2013, 27(4):393-398.
GONG Q, KONG QQ, LI T, et al. Application of reduction by posterior approach to treat severe spondylolisthesis[J]. *Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi*, 2013, 27(4):393-398. Chinese.
- [4] Amiot P, Lang K, Putzier M, et al. Comparative results between conventional and computer-assisted pedicle screws installation in the thoracic, lumbar, and sacral spine [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2000, 25(5):606-614.
- [5] 靳安民,姚伟涛,张辉,等. 腰椎内固定翻修术的初步研究[J]. *中华骨科杂志*, 2004, 24(9):525-529.
JIN AM, YAO WT, ZHANG H, et al. Preliminary study of revision surgery for failed lumbar spinal internal fixation[J]. *Zhonghua Gu Ke Za Zhi*, 2004, 24(9):525-529. Chinese.
- [6] 刘政,李宏伟,王爽. 胸腰椎椎弓根螺钉置入技术的比较分析与展望[J]. *中国组织工程研究*, 2017, 21(19):3102-3107.
LIU Z, LI HW, WANG S. Pedicle screw fixation for thoracic and lumbar diseases: a comparative analysis and prospects[J]. *Zhongguo Zu Zhi Gong Cheng Yan Jiu*, 2017, 21(19):3102-3107. Chinese.
- [7] 丁祥,李超,牛国旗,等. 个体化 3D 打印导向模板辅助强直性脊柱炎颈椎椎弓根螺钉置入的实验研究[J]. *实用医学杂志*, 2020, 36(8):1072-1076.
DING X, LI C, NIU GQ, et al. Experimental study of individualized 3D printing navigation template printing pedicle screw placement of cervical with ankylosing spondylitis[J]. *Shi Yong Yi Xue Za Zhi*, 2020, 36(8):1072-1076. Chinese.
- [8] 蒋维利,牛国旗,周功,等. 3D 打印技术辅助成人脊柱侧后凸畸形的术前规划及应用价值[J]. *中国骨伤*, 2020, 33(2):99-105.
JIANG WL, NIU GQ, ZHOU G, et al. 3D printing technology assisted the preoperative planning and application value in adult kyphoscoliosis deformity[J]. *Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma*, 2020, 33(2):99-105. Chinese with abstract in English.
- [9] 李超,牛国旗,蒋维利,等. 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[J]. *中国骨伤*, 2020, 33(7):649-654.
LI C, NIU GQ, JIANG WL, et al. Experimental study of individualized 3D printing guided template combined with thoracolumbar pedicle screw placement for the treatment of ankylosing spondylitis [J]. *Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma*, 2020, 33(7):649-654. Chinese with abstract in English.
- [10] Gloria A, Russo T, De Santis R, et al. 3D fiber deposition technique to make multifunctional and tailor-made scaffolds for tissue engineering applications[J]. *J Appl Biomater Biomech*, 2009, 7(3):141-152.
- [11] Hoque ME, Chuan YL, Pashby I. Extrusion based rapid prototyping technique: an advanced platform for tissue engineering scaffold fabrication[J]. *Biopolymers*, 2012, 97(2):83-93.
- [12] 穆婷,马成,冯浩然,等. 基于计算机辅助设计与 3D 打印技术的血管化腓骨游离移植修复下颌骨缺损的应用研究[J]. *实用医学杂志*, 2019, 35(23):3638-3643.
MU T, MA C, FENG HR, et al. Application research of vascularized fibular free grafting to repair mandibular defects based on computer-aided design and 3D printing technology[J]. *Shi Yong Yi Xue Za Zhi*, 2019, 35(23):3638-3643. Chinese.
- [13] Wong JY, Pfahnl AC. 3D Printing of Surgical instruments for long-duration space missions[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2014, 85(7):758-763.
- [14] Kawaguchi Y, Yabuki S, Styf J, et al. Back muscle injury after posterior lumbar spine surgery. Topographic evaluation of intramuscular pressure and blood flow in the porcine back muscle during surgery[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1966, 21:2683-2688.
- [15] Gejo R, Matsui H, Kawaguchi Y, et al. Serial changes in trunk muscle performance after posterior lumbar surgery[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1999, 24:1023-1028.
- [16] Park P, Garton HJ, Gala VC, et al. Adjacent segment disease after lumbar or lumbosacral fusion: review of the literature[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2004, 29:1938-1944.
- [17] Karim A, Mukherjee D, Ankem M, et al. Augmentation of anterior lumbar interbody fusion with anterior pedicle screw fixation: demonstration of novel constructs and evaluation of biomechanical stability in cadaveric specimens[J]. *Neurosurgery*, 2006, 58(3):522-527.
- [18] Zeiller SC, Lee J, Lim M, et al. Posterior thoracic segmental pedicle screw instrumentation: evolving methods of safe and effective placement[J]. *Neurol India*, 2005, 53(4):458-465.
- [19] Austin MS, Vaccaro AR, Brislin B, et al. Image-guided spine surgery: a cadaver study comparing conventional open laminoforaminotomy and two image-guided techniques for pedicle screw placement in posterolateral fusion and nonfusion models[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2002, 27(22):2503-2508.
- [20] 陈宣煌,许卫红,黄文化,等. 基于 3D 打印的腰椎椎弓根螺钉数字化置入及临床应用[J]. *中国组织工程研究*, 2015, 19(17):2752-2757.
CHEN XH, XU WH, HUANG WH, et al. Digital placement and clinical application of lumbar pedicle screws based on 3D printing [J]. *Zhongguo Zu Zhi Gong Cheng Yan Jiu*, 2015, 19(17):2752-2757. Chinese.

(收稿日期 2021-04-28 本文编辑:王宏)