

· 临床研究 ·

枢椎后路峡部螺钉固定的相关影像学测量

廖旭昱, 马维虎, 周雷杰, 刘观燧, 韩金明
(宁波市第六医院脊柱外科, 浙江 宁波 315040)

【摘要】 目的: 通过 CT 测量探讨枢椎峡部螺钉固定技术的安全性和可行性。方法: 收集 2016 年 1 月至 2019 年 12 月进行全颈椎 CT 检查的 137 例结构完整的上颈椎 CT 数据, 其中男 71 例, 女 66 例; 年龄 22~65(41.8±17.4) 岁。通过 Mimics 19.0 软件测量峡部螺钉技术相关的解剖学数据, 包括峡部宽度、峡部垂直长度、峡部垂直高度、峡部螺钉通道长度、峡部螺钉通道头倾角度。并分析各项指标之间的相关性。结果: 枢椎峡部宽度(9.05±1.63) mm, 垂直长度(11.21±1.43) mm, 垂直高度(17.53±2.93) mm。螺钉通道长度为(19.07±3.20) mm。峡部螺钉通道长度>14 mm 的占 94.53%, 14~16 mm 的占 82.12%, 16~18 mm 的占 63.14%, 18~20 mm 的占 39.78%。螺钉通道的头倾角度为 30°~68°, 平均(46.06±8.06)°。螺钉通道长度和头倾角度呈高度正相关($r=0.965, P=0.000$)。峡部垂直长度和螺钉通道长度, 峡部垂直长度和螺钉的头倾角度之间都呈轻度正相关($r=0.240, P=0.000; r=0.163, P=0.007$)。峡部宽度和螺钉通道长度, 峡部宽度和螺钉通道的头倾角度之间都呈中度负相关($r=-0.333, P=0.000; r=-0.380, P=0.000$)。结论: 进行枢椎后路峡部螺钉固定安全、可靠, 比枢椎后路椎弓根螺钉固定具有更大的适用范围, 可以作为椎弓根螺钉的替代选择。

【关键词】 枢椎; 椎弓峡部; 骨螺钉; 影像学; 测量
中图分类号: R681

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.2022.08.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Imaging measurement for the posterior pars interarticularis screw fixation on axis LIAO Xu-yu, MA Wei-hu, ZHOU Lei-jie, LIU Guan-yi, and HAN Jin-ming. Department of Spinal Surgery, Ningbo No.6 Hospital, Ningbo 315040, Zhejiang, China

ABSTRACT Objective: To explore the safety and feasibility of posterior pars interarticularis screw fixation on axis by CT measurement. **Methods:** The CT data of 137 patients with complete upper cervical spine who underwent full cervical spine CT examination from January 2016 to December 2019 were collected, including 71 males and 66 females, aged from 22 to 65 years old with an average of (41.8±17.4) years old. Mimics 19.0 software was used to measure anatomical data related to the pars interarticularis screw, including the pars width, pars vertical length, pars vertical height, length of pars screw trajectory, upward inclination angle of pars screw trajectory. And the correlation between each index was analyzed. **Results:** The axis pars has an average width of (9.05±1.63) mm, an average vertical length of (11.21±1.43) mm, and an average vertical height of (17.53±2.93) mm. The mean length of pars screw trajectory was (19.07±3.20) mm. Regarding to the length of pars screw trajectory, 94.53% of pars measured more than 14 mm, 82.12% of pars measured at 14~16 mm, 63.14% of pars measured at 16~18 mm, 39.78% of pars measured at 18~20 mm. The upward inclination angle of pars screw was 30°~68° with an average of (46.06±8.06)°. There was a highly positive correlation between the length of screw trajectory and upward inclination angle ($r=0.965, P=0.000$). The vertical length of pars was weakly positively correlated with length of screw trajectory and upward inclination angle ($r=0.240, P=0.000; r=0.163, P=0.007$). Pars width was moderately negative correlated with length of screw trajectory and upward inclination angle ($r=-0.333, P=0.000; r=-0.380, P=0.000$). **Conclusion:** The posterior pars interarticularis screw fixation is safe and reliable. It has a more wider applicability than pedicle screw fixation and can be used as an alternative to pedicle screws.

KEYWORDS Axis; Pars interarticularis; Bone screws; Imaging; Measurement

枢椎是上颈椎手术中重要的内固定支点, 在治疗颅底凹陷症, 寰枢椎不稳定, 上颈椎创伤、退变、肿瘤等疾病时, 常常需要在枢椎置钉, 以达到固定、复

位、减压和植骨融合的目的。然而, 椎动脉在行经枢椎横突孔时经常发生扭曲和高拱, 向上向内走行, 侵占部分椎弓根骨质, 引起椎弓根的宽度或高度减小, 称之为椎动脉高跨^[1-3]。据文献报道椎动脉高跨发生率为 9.5%~31%^[4-7], 椎动脉高跨时, 置入枢椎椎弓根螺钉时椎动脉损伤概率高达 5.3%~21%^[8-10], 进行寰枢椎经关节螺钉固定时椎动脉损伤发生率为 1.3%~8.2%^[11-12], 有时, 甚至无法置入螺钉。因此, 笔者通过

基金项目: 浙江省医药卫生科技项目(面上项目 编号: 2021455993)
Fund program: Zhejiang Medical and Health Science and Technology Project (General project No. 2021455993)
通讯作者: 廖旭昱 E-mail: liaoxuyumehf@sina.com
Corresponding author: LIAO Xu-yu E-mail: liaoxuyumehf@sina.com

收集 2016 年 1 月至 2019 年 12 月在宁波市第六医院进行全颈椎 CT 检查的 137 例结构完整的上颈椎 CT 资料,测量枢椎峡部的各项解剖学指标,设计枢椎峡部螺钉固定的方法,探讨置入枢椎峡部螺钉的安全性和可行性,以规避术中椎动脉损伤的风险。

1 资料与方法

1.1 病例选择

纳入标准:上颈椎结构完整;有清晰的上颈椎 CT 和三维重建影像学资料;年龄 22~65 岁。排除标准:上颈椎术后;CT 扫描提示上颈椎有感染、骨折、肿瘤,或者骨质破坏;上颈椎畸形;严重骨质疏松或者严重退变。

1.2 一般资料

收集 2016 年 1 月至 2019 年 12 月在宁波市第六医院进行全颈椎 CT 检查的 350 例门诊和住院患者的数据,其中 137 例符合纳入及排除标准。男 71 例,女 66 例;年龄 22~65(41.8±17.4)岁。

1.3 枢椎三维模型的建立

1.3.1 扫描设备 对检查者均行 64 排 CT 扫描(SIEMENS SOMATOM Definition AS128),扫描技术参数设为:层厚 1.0 mm,层间距 0.5 mm,球管电压 120 kV,电流 280 mA,窗宽 1 000,窗位 300,标准格式导入医学数字图像控制影像系统 Mimics 19.0 软件(比利时 Materialise 公司)中进行三维重建和测量。数据的测量和导入均由笔者完成。

1.3.2 扫描体位 中立位扫描:患者仰卧位,头部和颈部位于特殊的头颈保护架中,颈椎自然伸直,避免头过伸或者过屈,双肩水平对称,头矢状位与扫描仪器垂直,垂直矢状正中定位线通过鼻梁及喉结,两外眦线与扫描平面平行(图 1)。

1.4 观察项目与方法

1.4.1 枢椎峡部宽度 从头端向尾端进行 CT 横断面扫描,定位相显示在三维重建矢状面上平分横突孔时,测量峡部外缘和椎管外壁的水平距离(图 2)。

1.4.2 枢椎峡部垂直长度 从头端向尾端进行 CT 横断面扫描,定位相显示在三维重建 CT 旁矢状面上横突孔最尾端时,测量横突孔后壁水平线和枢椎下关节突背侧缘之间的垂直距离(图 3)。

1.4.3 枢椎峡部垂直高度 从左侧向右侧进行 CT 扫描,当扫描至横突孔层面中央时测量峡部垂直高度,即枢椎上关节面后缘和

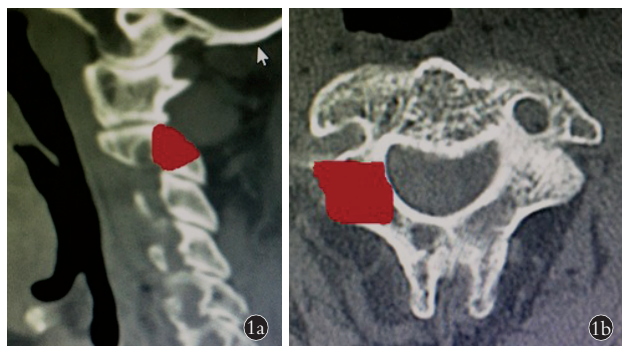


图 1 枢椎峡部 CT 扫描示意图,红色阴影区域表示峡部 1a. 枢椎矢状位 1b. 枢椎轴状位

Fig.1 Schematic diagram of pars interarticularis by CT scanning. The red shaded area indicates the isthmus 1a. Sagittal CT on axis 1b. Axial CT on axis

下关节突下缘之间的垂直距离(图 4)。

1.4.4 CT 规划下枢椎峡部螺钉通道长度 轴位相 CT 扫描平分枢椎横突孔时,重建矢状面 CT 测量从峡部螺钉进钉点(枢椎下关节突下缘头侧 3 mm)和枢椎上关节面后缘的距离(图 5)。

1.4.5 CT 规划下枢椎峡部螺钉通道的头倾角度 定位相冠状面三维重建 CT 扫描平分横突孔时(图 4b),在矢状面重建 CT 测量峡部螺钉通道和水平面的夹角(图 6)。

1.5 统计学处理

采用 SPSS 19.0 统计软件对测量数据进行处理,各个测量参数以均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示,左右侧进行配对 *t* 检验,男女之间采用独立样本 *t* 检验,以 *P* < 0.05 为差异有统计学意义。枢椎峡部宽度、高度、长度、螺钉通道长度和头倾角度 5 个测量指标之间进



图 2 枢椎峡部宽度的影像学测量 2a. 枢椎轴位 CT 上峡部宽度(黑色双箭头) 2b. 定位相显示在三维重建矢状面上平分横突孔 2c. 椎弓根狭窄型的峡部宽度(黑色双箭头)

Fig.2 Imaging measurement of interarticularis pars width on axis 2a. Pars interarticularis width in the axial CT on axis (black double arrows) 2b. The positioning phase was shown to bisect the transverse foramen on the reconstructed sagittal plane 2c. Interarticularis pars width with narrow foramen on axis (black double arrows)



图 3 枢椎峡部垂直长度的影像学测量 **3a.** 枢椎轴位 CT 上峡部垂直长度(黑色双箭头) **3b.** 三维重建 CT 显示横突孔后壁和枢椎下关节突背侧缘之间的垂直距离(黑色双箭头)

Fig.3 Imaging measurement of vertical length of pars interarticularis on axis **3a.** Pars interarticularis vertical length on axial CT of axis (black double arrows) **3b.** Three-dimensional reconstruction CT showed the vertical distance between the posterior wall of the transverse foramen and the dorsal edge of the inferior articular process (black double arrows)

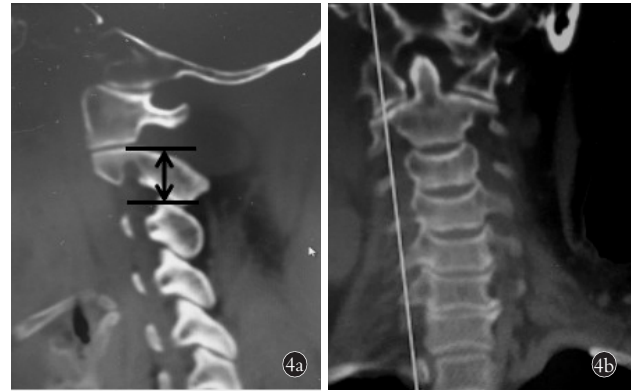


图 4 枢椎峡部垂直高度的影像学测量 **4a.** 枢椎矢状面重建 CT 上峡部垂直高度(黑色双箭头) **4b.** CT 冠状面重建定位相显示平分横突孔

Fig.4 Imaging measurements of vertical height of pars interarticularis on axis **4a.** Vertical height of pars interarticularis on reconstructed CT of axis (black double arrows) **4b.** Locating phase display bisecting the transverse foramen on the reconstructed coronal plane CT

行 Pearson 相关性分析, $P < 0.05$ 时, 表示在 0.05 水平(双侧)上两个变量之间存在显著相关关系。

2 结果

男性 C₂ 峡部宽度 5.74~13.02 mm, 峡部垂直高度 10.72~23.76 mm, 峡部垂直长度 8.62~15.94 mm, 峡部螺钉通道长度 12.65~26.01 mm, 峡部螺钉头倾角度 30°~68°。女性 C₂ 峡部宽度 5.71~11.92 mm, 峡部垂直高度 10.61~22.92 mm, 峡部垂直长度 8.55~15.38 mm, 峡部螺钉通道长度 12.12~24.82 mm, 峡部螺钉头倾角度 31°~66°。男性 C₂ 峡部宽度、垂直高

度、垂直长度、螺钉通道长度和螺钉头倾角度与女性比较差异均无统计学意义 ($P > 0.05$, 表 1)。

137 例患者左侧 C₂ 峡部宽度 5.71~11.92 mm, 峡部垂直高度 10.61~23.76 mm, 峡部垂直长度 8.75~15.94 mm, 峡部螺钉通道长度 12.12~25.20 mm, 峡部螺钉头倾角度 30°~66°。右侧 C₂ 峡部宽度 6.25~13.02 mm, 峡部垂直高度 11.68~23.74 mm, 峡部垂直长度 8.55~15.38 mm, 峡部螺钉通道长度 13.11~26.01 mm, 峡部螺钉头倾角度 32°~68°。左侧 C₂ 峡部宽度、垂直高度、垂直长度、螺钉通道长度和螺钉头倾角度与右侧比较差异无统计学意义 ($P > 0.05$, 表 1)。



图 5 枢椎峡部螺钉通道长度的影像学测量 **5a.** 重建矢状面 CT 上峡部螺钉通道长度, 进针点在 C₂ 下关节突下缘头侧 3 mm (黑色单箭头) **5b.** 轴位 CT 定位相显示平分横突孔 **5c.** 椎动脉高跨型的峡部螺钉通道长度

Fig.5 Imaging measurement of pars interarticularis screw trajectory on axis **5a.** Sagittal reconstructed CT image demonstrating the length of pars interarticularis screw trajectory and the entry point 3-mm rostral to the inferior edge of the C₂ inferior articular process (black single arrow) **5b.** Locating phase display bisecting the transverse foramen on the coronal CT **5c.** Length of pars interarticularis screw trajectory with high riding vertebral artery (HRVA)

枢椎峡部螺钉通道长度 12.12~26.01 (19.07±3.20) mm, 峡部螺钉通道长度 >14 mm 的占 94.53%, 14~16 mm 的占 82.12%, 16~18 mm 的占 63.14%, 18~20 mm 的占 39.78%。螺钉通道的头倾角度 30°~68°(46.06±8.06)°。峡部螺钉通道长度和头倾角度呈高度正相关 ($r=0.965, P=0.000$) (图 7)。峡部的垂直长度和螺钉通道长度, 峡部的垂直长度和螺钉通道的头倾角度之间都呈轻度正相关 ($r=0.240, P=0.000; r=0.163, P=0.007$)。峡部的宽度和峡部螺钉通道长度, 峡部的宽度和螺钉通道的头倾角度之间都呈中度负相关 ($r=-0.333, P=0.000; r=-0.380, P=0.000$)。见表 2。

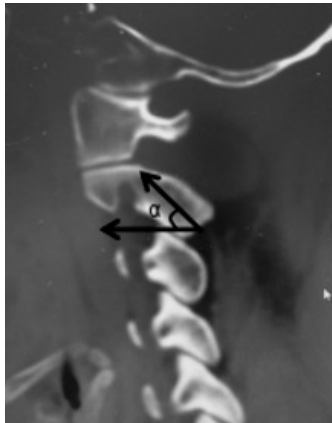


图 6 矢状面重建 CT 上峡部螺钉通道的头倾角度 α
Fig.6 Upward inclination angle (α) of pars interarticularis screw trajectory in sagittal reconstructed CT

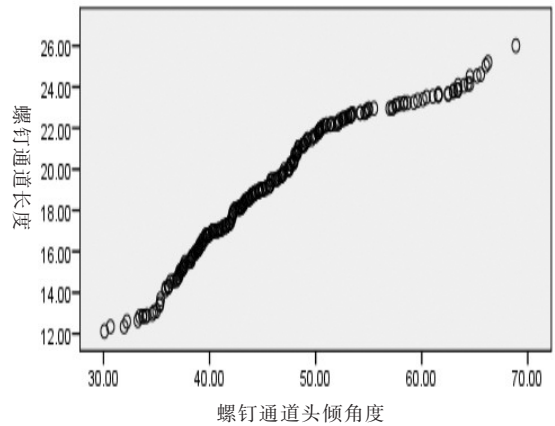


图 7 峡部螺钉通道长度和头倾角度之间的关系
Fig.7 Relationship between the length of pars interarticularis screw tunnel and upward inclination angle

表 1 枢椎峡部螺钉固定 137 例患者的 CT 测量数据 ($\bar{x} \pm s$)

Tab.1 The data of CT measurement of pars interarticularis screw fixation on axis in 137 patients ($\bar{x} \pm s$)

测量指标	左侧	右侧	双侧	男性	女性
峡部宽度 (mm)	8.84±1.60	9.26±1.71	9.05±1.63	9.09±1.46	8.92±1.52
峡部垂直长度 (mm)	11.26±1.55	11.15±1.32	11.21±1.43	11.28±1.38	11.14±1.33
峡部垂直高度 (mm)	17.46±3.15	17.62±2.89	17.53±2.93	17.59±2.67	17.44±3.12
峡部螺钉通道长度 (mm)	18.88±3.18	19.29±3.29	19.07±3.20	19.11±3.16	19.02±2.66
峡部螺钉头倾角度 (°)	44.98±9.04	47.14±6.81	46.06±8.06	46.07±6.52	46.04±7.54

注:左右侧比较,峡部宽度, $t=0.354, P=0.623$; 峡部垂直高度, $t=0.376, P=0.768$; 峡部垂直长度, $t=0.421, P=0.564$; 峡部螺钉通道长度, $t=0.460, P=0.738$; 峡部螺钉头倾角度, $t=0.381, P=0.554$ 。男性和女性比较,峡部宽度, $t=0.264, P=0.973$; 峡部垂直高度, $t=1.312, P=0.137$; 峡部垂直长度, $t=1.235, P=0.321$; 峡部螺钉通道长度, $t=0.872, P=0.670$; 峡部螺钉头倾角度, $t=1.381, P=0.215$

Note: Left-right comparison: pars interarticularis width, $t=0.354, P=0.623$; pars interarticularis vertical height, $t=0.376, P=0.768$; pars interarticularis vertical length, $t=0.421, P=0.564$; length of pars interarticularis screw trajectory, $t=0.460, P=0.738$; upward inclination angle of pars interarticularis screw, $t=0.381, P=0.554$. Male and female comparison: pars interarticularis width, $t=0.264, P=0.973$; pars interarticularis vertical height, $t=1.312, P=0.137$; pars interarticularis vertical length, $t=1.235, P=0.321$; length of pars interarticularis screw trajectory, $t=0.872, P=0.670$; upward inclination angle of pars interarticularis screw, $t=1.381, P=0.215$

表 2 枢椎峡部各项测量指标之间的 Pearson 相关性

Tab.2 Pearson correlation between various measurement indexes in axis pars

项目	峡部宽度	峡部垂直长度	峡部垂直高度	峡部螺钉通道长度	峡部螺钉通道头倾角度
峡部宽度	1	0.055	-0.126*	-0.333**	-0.380**
峡部垂直长度		1	0.067	0.240**	0.163**
峡部垂直高度			1	-0.033	-0.029
峡部螺钉通道长度				1	0.965**
峡部螺钉通道头倾角度					1

注: *在 0.05 水平(双侧)上显著相关。 **在 0.01 水平(双侧)上显著相关

Note: * Significantly correlated at the level of 0.05 (bilateral). **Significantly correlated at the level of 0.01 (bilateral)

3 讨论

3.1 枢椎峡部的解剖特点及枢椎峡部螺钉固定的意义

枢椎作为特殊椎体,上下终板之间区域为椎体,

上下关节突不在同一个冠状面上, 峡部位于上下关节突之间, 也称关节突间部(pars interarticularis)^[13]。侯黎升等^[14]以横突为界, 将横突后结节和下关节突前方的区域称之为峡部, 将枢椎的上下关节突及其

间的峡部合称为侧块。Naderi 等^[15]认为枢椎椎弓根位于峡部下方,将椎体与峡部和下关节突相连。Yuan 等^[16]将枢椎上关节突和下关节突之间的骨性结构称为椎弓峡部复合体 (pediculoisthmia component, PIC)。其中上关节面以下扁平部分称为峡部,复合体下半部分是椎弓根,被峡部覆盖。

1987 年, Magerl 等^[17]采用寰枢椎经关节螺钉治疗寰枢椎不稳定, 后简称 Magerl 螺钉。2001 年, Harms 等^[18]将寰椎侧块螺钉和枢椎椎弓根螺钉联合应用于上颈椎领域。Magerl 螺钉和枢椎椎弓根螺钉都要依次经过枢椎峡部、横突孔和椎动脉的内侧、进入寰椎侧块和枢椎椎体, 文献报道 10% 的枢椎不适合 Magerl 螺钉技术^[19], 20%~27.5% 的枢椎不适合椎弓根螺钉技术^[20]。

Wright^[21]提出的枢椎椎板螺钉固定虽可取得满意的疗效, 但该技术有螺钉进入椎管内的潜在风险; 还存在固定强度弱^[22], 脱位术后复位丢失^[23-24]和枕骨螺钉以及下颈椎螺钉是斜向连接, 占据植骨床等缺陷。因为青少年或者儿童的椎板发育不完全, 所以椎板螺钉的适用人群也受到限制。

枢椎峡部螺钉从枢椎下关节突内下象限进针, 以一定的头倾角度朝向枢椎上关节面后缘, 螺钉全程位于峡部骨质内。由于螺钉止于横突孔后壁, 不进入椎弓根, 减少了接触椎动脉的机会, 就大大降低了损伤椎动脉的风险。峡部螺钉和寰椎、下颈椎侧块或椎弓根螺钉以及枕骨螺钉钉尾在一条直线上, 术中连接杆的安装更加简单, 也有利于术中提拉复位。

3.2 峡部螺钉通道的长度和头倾角度的关系

马向阳等^[25]测量发现, 枢椎侧块钉道平均长度为 18.33 mm。Hoh 等^[26]研究发现枢椎峡部钉道长度平均为 20.70 mm。Kothari 等^[7]通过 CT 测量将枢椎峡部分为两组, 椎动脉高跨组峡部可以容纳螺钉长度为 13.69 mm, 椎动脉孔正常组为 20.65 mm。本研究中, 94.53% 的患者可以采用长度 >14 mm 的峡部螺钉, 82.12% 的患者可以采用 14~16 mm 长的峡部螺钉, 63.14% 的患者可以采用 16~18 mm 长的峡部螺钉, 39.78% 的患者可以采用 18~20 mm 长的峡部螺钉。枢椎峡部钉道平均长度 (19.07±3.20) mm, 最短 12.12 mm, 最长 26.01 mm, 提示术中可以采用长度为 12~26 mm 的峡部螺钉。

枢椎峡部的平均垂直长度 (11.21±1.43) mm, 垂直高度 (17.53±2.93) mm, 根据三角形勾股定理提示峡部螺钉置入时需要一定的头倾角度才能获得足够的长度。本文测得峡部钉道平均头倾角度 (46.06±8.06)°, 最小 30°, 最大 68°。头倾角度在 30°~68°, 峡部螺钉长度和头倾角度呈紧密正相关, 螺钉长度随

着头倾角度增大而增加。颈椎后路手术中, 患者通常处于头高脚低位, 在进行峡部螺钉置钉时, 受下颈椎椎板和棘突, 甚至后凸胸椎的阻挡, 难以获得足够的头倾角度, 笔者将进针点选择在枢椎下关节突下缘头侧 3 mm, 和马向阳等^[25]报道的侧块螺钉比较, 将进针点上移 1 mm, 相应的减少了螺钉的头倾角度, 降低了术中置钉时的操作难度。

Mummaneni 等^[27]认为枢椎峡部螺钉置钉时应向内侧倾斜 10°~15°, 马向阳等^[25]认为螺钉应内倾 5°, 刘磊等^[28]将钉道改良为外倾 13°, 来获得更长的螺钉通道长度。但 Hoh 等^[26]通过 CT 测量发现内倾 10°~15°时较内倾 0° (垂直进针) 时钉道长度只能增加 3.5%, 实际增加长度 <1 mm, 所以本研究采用垂直进针的方法, 以规避螺钉向内外侧倾斜造成脊髓损伤和椎动脉损伤的风险。临床中, 峡部螺钉长度和头倾角度应注意个体差异, 具体的每个病例要以术前 CT 测量值为准。

3.3 峡部宽度、垂直高度、螺钉通道长度、螺钉通道头倾角度的关系

峡部垂直高度、螺钉通道长度、螺钉通道头倾角度和峡部宽度之间呈负相关。峡部宽度和垂直高度之间相关程度较弱 ($r=-0.126, P=0.037$); 螺钉通道长度、螺钉通道头倾角度和峡部宽度之间相关程度中等 ($r=-0.333, P=0.000; r=-0.380, P=0.000$)。提示临床上遇到峡部较宽的病例, 在置入峡部螺钉时要相应的减小螺钉长度, 避免穿破横突孔, 损伤椎动脉。

3.4 本研究的不足之处

本研究是通过 CT 扫描影像资料获得, 在测量过程中, 可能存在部分偏差, 后期需要进一步在尸体上进行实体测量, 更准确的评估螺钉长度和角度以及螺钉把持力量等方面的研究。

综上所述, 枢椎峡部螺钉具有更广泛的适用人群, 可以行椎弓根螺钉固定的患者同样适用于峡部螺钉固定, 有时峡部螺钉长度和椎弓根螺钉长度接近。峡部螺钉置钉时内倾角度 0°, 只要垂直进针, 术中容易掌握, 不需要椎弓根螺钉那样需要精确的内倾角度。对于椎动脉高跨患者, 峡部螺钉可以作为椎弓根螺钉的替代选择。术中如果能和现代导航技术相结合, 更能增加枢椎峡部螺钉的安全性和精确性。

参考文献

- [1] Yeom JS, Buchowski JM, Kim HJ, et al. Risk of vertebral artery injury: comparison between C₁-C₂ transarticular and C₂ pedicle screws [J]. Spine J, 2013, 13(7): 775-785.
- [2] Neo M, Matsushita M, Iwashita Y, et al. Atlantoaxial transarticular screw fixation for a high riding vertebral artery [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2003, 28(7): 666-670.
- [3] Bloch O, Holly LT, Park J, et al. Effect of frameless stereotaxy on the accuracy of C₁-C₂ transarticular screw placement [J]. J Neuro-

- surg, 2001, 95(1 Suppl): 74–79.
- [4] Wang JH, Xia H, Ying QS, et al. An anatomic consideration of C₂ vertebrae artery groove variation for individual screw implantation in axis[J]. *Eur Spine J*, 2013, 22(7): 1547–1552.
- [5] Yamazaki M, Okawa A, Furuya T, et al. Anomalous vertebral arteries in the extra and intraosseous regions of the craniovertebral junction visualized by 3 dimensional computed tomographic angiography: analysis of 100 consecutive surgical cases and review of the literature [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2012, 37(22): E1389–E1397.
- [6] 王建华, 尹庆水, 夏虹, 等. 枢椎椎动脉孔解剖分型与椎弓根置钉关系的研究[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2006, 16(9): 677–680. WANG JH, YIN QS, XIA H, et al. A study of the relationship between axial vertebral artery canal and placement of pedicle screw [J]. *Zhongguo Ji Zhu Ji Sui Za Zhi*, 2006, 16(9): 677–680. Chinese.
- [7] Kothari MK, Dalvie SS, Gupta S, et al. The C₂ pedicle width, pars length, and laminar thickness in concurrent ipsilateral ponticulus posticus and high riding vertebral artery: a radiological computed tomography scan based study [J]. *Asian Spine J*, 2019, 13(2): 290–295.
- [8] Yeom JS, Buchowski JM, Park KW, et al. Undetected vertebral artery groove and foramen violations during C₁ lateral mass and C₂ pedicle screw placement [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2008, 33(25): E942–E949.
- [9] Ondra SL, Marzouk S, Ganju A, et al. Safety and efficacy of C₂ pedicle screws placed with anatomic and lateral C arm guidance [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2006, 31(9): E263–E267.
- [10] Su BW, Shimer AL, Chinthakunta S, et al. Comparison of fatigue strength of C₂ pedicle screws, C₂ pars screws, and a hybrid construct in C₁–C₂ fixation [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2014, 39(1): E12–E19.
- [11] Wright NM, Laurysen C. Vertebral artery injury in C₁–C₂ transarticular screw fixation: results of a survey of the AANS/CNS section on disorders of the spine and peripheral nerves [J]. *J Neurosurg*, 1998, 88(4): 634–640.
- [12] Neo M, Fujibayashi S, Miyata M, et al. Vertebral artery injury during cervical spine surgery: a survey of more than 5600 operations [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2008, 33(7): 779–785.
- [13] Borne GM, Bedou GL, Pinaudeau M. Treatment of pedicular fractures of the axis. A clinical study and screw fixation technique [J]. *J Neurosurg*, 1984, 60(1): 88–93.
- [14] 侯黎升, 贾连顺, 谭军, 等. 枢椎各结构的解剖学部位研究[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2005, 23(1): 44–48. HOU LS, JIA LS, TAN J, et al. The structures and position of vertebra dentate: an anatomic study [J]. *Zhongguo Lin Chuang Jie Pou Xue Za Zhi*, 2005, 23(1): 44–48. Chinese.
- [15] Naderi S, Arman C, Guvencer M, et al. An anatomical study of the C₂ pedicle [J]. *J Neurosurg Spine*, 2004, 1(3): 306–310.
- [16] Yuan F, Yang HL, Guo KJ, et al. A clinical morphologic study of the C₂ pedicle and isthmus [J]. *Eur Spine J*, 2013, 22(1): 39–45.
- [17] Magerl F, Seemann PS. Stable posterior fusion of the atlas and axis by transarticular screw fixation. In: Kehr P, Weidner A, eds. *Cervical Spine I* [M]. Strassbourg: Springer Vienna, 1987: 322–327.
- [18] Harms J, Melcher RP. Posterior C₁–C₂ fusion with polyaxial screw and rod fixation [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2001, 26(22): 2467–2471.
- [19] Mandel IM, Kambach BJ, Petersilge CA, et al. Morphologic considerations of C₂ isthmus dimensions for the placement of transarticular screws [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2000, 25(12): 1542–1547.
- [20] Wajanavisit W, Lertudomphonwanit T, Fuangfa P, et al. Prevalence of high riding vertebral artery and morphometry of C₂ pedicles using a novel computed tomography reconstruction technique [J]. *Asian Spine J*, 2016, 10(6): 1141–1148.
- [21] Wright NM. Posterior C₂ fixation using bilateral crossing C₂ laminar screws: case series and technical note [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2004, 17(2): 158–162.
- [22] 高延征, 邢帅, 高坤, 等. 枢椎椎板螺钉固定与枢椎椎弓根螺钉固定对枕颈融合术临床疗效的影响 [J]. *脊柱外科杂志*, 2016, 14(3): 129–134. GAO YZ, XING S, GAO K, et al. Influence of axis vertebral plate screw fixation and axis pedicle screw fixation on clinical outcomes of occipitocervical fusion [J]. *Ji Zhu Wai Ke Za Zhi*, 2016, 14(3): 129–134. Chinese.
- [23] 马向阳, 尹庆水, 吴增晖, 等. 枢椎椎板螺钉与椎弓根螺钉抗拔出强度的比较 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2007, 17(2): 137–139. MA XY, YIN QS, WU ZH, et al. Biomechanical evaluation of the pull out strength of posterior C₂ trans laminar screw and pedicle screw fixation [J]. *Zhongguo Ji Zhu Ji Sui Za Zhi*, 2007, 17(2): 137–139. Chinese.
- [24] Ma XX, Peng XB, Xiang H, et al. A finite element modeling of posterior atlantoaxial fixation and biomechanical analysis of C₂ intralaminar screw fixation [J]. *Chin Med J (Engl)*, 2014, 127(7): 1266–1271.
- [25] 马向阳, 尹庆水, 夏虹, 等. 枢椎后路侧块螺钉固定的解剖研究 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2004, 14(7): 417–420. MA XY, YIN QS, XIA H, et al. Anatomic evaluation of the posterior lateral mass screw fixation on axis [J]. *Zhongguo Ji Zhu Ji Sui Za Zhi*, 2004, 14(7): 417–420. Chinese.
- [26] Hoh DJ, Liu CY, Wang MY. A radiographic computed tomography based study to determine the ideal entry point, trajectory, and length for safe fixation using C₂ pars interarticularis screws [J]. *J Neurosurg Spine*, 2010, 12(6): 602–612.
- [27] Mummaneni PV, Haid RW. Atlantoaxial fixation: overview of all techniques [J]. *Neurol India*, 2005, 53(4): 408–415.
- [28] 刘磊, 廖文波, 范红松, 等. 枢椎后路改良侧块螺钉钉道的 CT 测量 [J]. *遵义医学院学报*, 2017, 40(2): 200–207. LIU L, LIAO WB, FAN HS, et al. Computerized tomography morphometric analysis for the posterior improved lateral mass screw fixation on axis [J]. *Zun Yi Yi Xue Yuan Xue Bao*, 2017, 40(2): 200–207. Chinese.

(收稿日期: 2021–10–21 本文编辑: 王宏)