

· 临床论著 ·

## 机器人辅助椎弓根外穿刺经皮后凸成形术

高鑫峰, 夏韶祺, 赵志刚\*, 夏平

(武汉市第四医院骨科, 湖北武汉 430033)

**摘要:** [目的] 探讨骨科机器人辅助下经椎弓根外入路穿刺后凸成形术 (percutaneous kyphoplasty, PKP) 治疗骨质疏松性椎体压缩性骨折 (osteoporotic vertebral compression fracture, OVCF) 的疗效。[方法] 回顾性分析 2019 年 3 月—2022 年 3 月单侧椎弓根外入路穿刺 PKP 治疗 OVCF 的 43 例患者的临床资料。根据医患沟通结果, 18 例采用机器人辅助导航穿刺 (机器人组), 25 例采用传统透视引导穿刺 (透视组)。对比分析两组围手术期、随访及影像学资料。[结果] 机器人组手术时间显著长于透视组 [(43.5±5.2) min vs (26.2±4.9) min,  $P<0.001$ ], 但是, 机器人组术中透视次数显著少于透视组 [(3.3±0.8) 次 vs (8.8±3.3) 次,  $P<0.001$ ]。两组穿刺成功率、骨水泥渗漏率、下地行走时间、住院天数的差异均无统计学意义 ( $P>0.05$ )。术后平均随访时间 (19.8±5.7) 个月, 两组恢复完全负重活动时间的差异无统计学意义 ( $P>0.05$ )。术后随时间推移, 两组患者 VAS、ODI 评分均显著减少 ( $P<0.05$ ), 相应时间点, 两组间 VAS、ODI 评分的差异均无统计学意义 ( $P>0.05$ )。影像方面, 两组骨水泥分布优秀率比较差异无统计学意义 ( $P>0.05$ ), 两组术后局部后凸 Cobb 角、椎体前缘相对高度均显著改善 ( $P<0.05$ )。相应时间点, 两组间的上述影像指标的差异均无统计学意义 ( $P>0.05$ )。[结论] 机器人导航可以减少透视次数, 但是增加了手术时间, 可以作为目前手术方法的一种有益补充。

**关键词:** 骨质疏松性椎体压缩骨折, 椎弓根外后凸成形术, 骨科机器人, 临床结果

**中图分类号:** R687 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2024) 06-0487-06

**Robot-assisted extrapedicular percutaneous kyphoplasty // GAO Xin-feng, XIA Shao-qiang, ZHAO Zhi-gang, XIA Ping. Department of Orthopedics, The Fourth Hospital of Wuhan City, Wuhan 430033, China**

**Abstract: [Objective]** To investigate the clinical outcomes of robot-assisted extrapedicular percutaneous kyphoplasty (PKP) for the treatment of osteoporotic vertebral compression fracture (OVCF). **[Methods]** A retrospective study was conducted on 43 patients who received extrapedicular PKP for OVCF from March 2019 to March 2022. According to the preoperative doctor-patient communication, 18 cases underwent robot-assisted puncture (robot group), while other 25 cases underwent traditional fluoroscopy guided puncture (fluoroscopy group). The perioperative, follow-up and imaging data of the two groups were compared and analyzed. **[Results]** Although the robot group consumed significantly longer operative time than the fluoroscopy group [(43.5±5.2) min vs (26.2±4.9) min,  $P<0.001$ ], the former was significantly less than the latter in term of intraoperative fluoroscopy number [(3.3±0.8) times vs (8.8±3.3) times,  $P<0.001$ ]. There were no significant differences in first puncture success rate, bone cement leakage rate, walking time and hospitalization days between the two groups ( $P>0.05$ ). The mean follow-up time was (19.8±5.7) months, and there was no significant difference between the two groups in the time to return to full weight-bearing activities ( $P>0.05$ ). The VAS and ODI scores were significantly decreased in both groups over time ( $P<0.05$ ), which were not significantly different between the two groups at any corresponding time points ( $P>0.05$ ). As for imaging, there was no significant difference in the excellence rate of bone cement distribution between the two group ( $P>0.05$ ). The local kyphotic Cobb angle and the relative anterior vertebral height significantly improved postoperatively compared with those preoperatively in both groups ( $P<0.05$ ), whereas which proved not statistically significant between the two groups at any time points accordingly ( $P>0.05$ ). **[Conclusion]** Robotic navigation can reduce the number of fluoroscopy, but increase the operation time, and can be a useful supplement to current surgical methods.

**Key words:** osteoporotic vertebral compression fracture, extrapedicular percutaneous kyphoplasty, orthopedic robot, clinical outcome

随着人口老龄化的逐步进展, 骨质疏松症在我国 65 岁以上人群中的发病率是 32.0%, 其中女性更是

高达 51.6%<sup>[1]</sup>。与之伴随的是骨质疏松性骨折的并发症也在快速增加, 其中最常见的是骨质疏松性椎体

DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2024.06.02

作者简介: 高鑫峰, 副主任医师, 研究方向: 脊柱外科, (电话)13871166769, (电子信箱)wuhangaoinfeng@163.com

\* 通信作者: 赵志刚, (电子信箱)429753470@qq.com

压缩性骨折 (osteoporotic vertebral compression fractures, OVCF)。OVCF 可导致严重的腰背痛, 以及长时间的卧床和劳动力丧失, 已经造成巨大的社会负担和经济负担<sup>[2]</sup>。椎体强化术, 包括经皮椎体成形术 (percutaneous vertebroplasty, PVP) 和经皮后凸成形术 (percutaneous kyphoplasty, PKP), 是多种指南推荐的治疗急性症状性 OVCF 的首选治疗方法<sup>[3]</sup>。通过经皮通道在椎体内注入骨水泥可迅速稳定椎体, 改善腰背痛并恢复功能<sup>[4]</sup>, 避免长期卧床造成的劳动力丧失及并发症。临床疗效主要取决于骨水泥灌注量和分布情况<sup>[5]</sup>, 与穿刺方法无明显关系。单侧穿刺手术时间更短、创伤更小<sup>[6]</sup>, 是目前较常用的方法。双侧穿刺因为手术时间相对较长, 已较少使用<sup>[7]</sup>。有些患者胸椎或上腰椎的椎弓根直径较细, 且内倾角较小, 经椎弓根路径穿刺针很难到达中线。此时常采用椎弓根外入路<sup>[8]</sup>, 可以不受椎弓根的影响。自从本院引进天玑机器人后, 在机器人的辅助下, 穿刺更加方便快捷。现将机器人辅助技术与常规透视下 PKP 的临床结果比较如下。

## 1 资料与方法

### 1.1 纳入与排除标准

纳入标准: (1) 年龄 >60 岁, 双能 X 线法 (DXA) 提示合并骨质疏松症 (T 值 ≤ -2.5 SD); (2) 急性骨质疏松性骨折 (症状时间 <6 周)<sup>[9]</sup>; (3) 骨折节段位于胸椎和上腰椎 (T<sub>11</sub>~L<sub>2</sub>); (4) 无脊髓和马尾神经损伤症状; (5) 均采用椎弓根外 PKP 治疗。

排除标准: (1) 病理性骨折; (2) 高能量损伤导致的骨折脱位; (3) 椎体缺血性骨坏死; (4) 有手术禁忌证或不能耐受俯卧位手术。

### 1.2 一般资料

回顾性分析本院 2019 年 3 月—2022 年 3 月所有采用椎弓根外入路 PKP 患者的临床资料, 其中 43 例患者符合以上纳入标准, 且获随访 12 个月以上。根据医患沟通结果, 18 例使用机器人辅助导航穿刺 (机器人组), 25 例采用传统透视引导穿刺 (透视组)。两组一般资料见表 1。两组患者年龄、性别、BMI、损伤至手术时间、骨密度值、OTLICS 分型的差异均无统计学意义 ( $P>0.05$ )。本研究已获得本院伦理委员会批准 [伦审字 (KY2021-0025-01) 号], 所有患者均知情同意。

### 1.3 手术方法

两组患者均采用局部麻醉下单侧椎弓根外入路,

选椎体压缩较重侧穿刺进针, 由同一手术组医生完成。

指标	机器人组 (n=18)	透视组 (n=25)	P 值
年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$ )	72.7±6.5	71.4±6.4	0.954
性别 (例, 男/女)	3/15	4/21	0.953
BMI (kg/m <sup>2</sup> , $\bar{x} \pm s$ )	21.0±2.7	20.6±2.1	0.436
损伤至手术时间 (d, $\bar{x} \pm s$ )	6.5±7.9	5.9±6.8	0.313
骨密度值 (T 值, $\bar{x} \pm s$ )	-3.7±0.6	-3.8±0.7	0.459
OTLICS 分型 (例, ≤3/4/≥5)	1/7/10	2/10/13	0.943

机器人组: 患者取俯卧位, 体表定位后消毒铺巾, 使用无菌贴膜将机器人示踪器固定在手术节段邻近皮肤。控制机械臂放置定位标尺于术野皮肤上。C 形臂 X 线机定位无误后环形扫描采集图像并行三维重建, 传输数据至工作站。胸椎穿刺路径通过肋横突间隙, 穿刺靶点位于椎弓根外侧与椎体交界处<sup>[10]</sup>。腰椎穿刺路径为横突上缘-椎弓根外缘-椎体。穿刺针尖端位于椎体前 1/3, 矢状面上位于椎体骨折线处。助手规划完成后操作机械臂模拟运行至目标位。使用 1% 利多卡因局部浸润麻醉, 做 5 mm 皮肤切口。安装导向套筒并插至进钉点骨皮质表面。微调机械臂至误差 <1 mm, 使用电钻安装导针。C 形臂 X 线机透视确认置针正确后, 安装工作套筒。使用球囊 (山东冠龙医疗用品有限公司) 进行椎体撑开, 然后 C 形臂 X 线机监视下缓慢注入骨水泥 4~6 ml, 术中即时监测进针深度及骨水泥弥散情况, 尽量使骨水泥均匀分布并避免漏出<sup>[11]</sup>。

透视组: 患者取俯卧位, 背部常规消毒铺巾, G 形臂 X 线机调整至标准正侧位。椎弓根体表投影外上缘 2~3 cm 处为皮肤进针点, 穿刺针呈内收尾倾方向到达椎弓根外上缘 2 mm 处。调整穿刺方向, 在 G 形臂 X 线机透视引导下缓慢拧入穿刺针。腰椎穿刺通过横突时会有落空感, 然后穿刺针在椎弓根外侧壁滑行至椎体交界处再度穿入。直至正位透视穿刺针到达椎体中央, 侧位到达椎体前 1/3 处。穿刺完成透视无误后置入工作套管, 后续操作同机器人组。

### 1.4 评价指标

记录围手术期资料, 包括手术时间、穿刺透视次数、一次穿刺成功率、下地行走时间、骨水泥渗漏率、住院时间。采用完全负重活动时间、疼痛视觉模拟评分 (visual analogue scale, VAS)、Oswestry 功能障

碍指数 (Oswestry disability index, ODI) 评价临床效果。行影像学检查, 记录骨水泥分布优秀率、局部后凸 Cobb 角 (伤椎上下终板的夹角)、椎体前缘相对高度。

### 1.5 统计学方法

采用 SPSS 25.0 软件进行统计学分析。计量数据

以  $\bar{x} \pm s$  表示, 资料呈正态分布时, 两组间比较采用独立样本  $t$  检验; 组内时间点间比较采用单因素方差分析; 资料呈非正态分布时, 采用秩和检验。计数资料采用  $\chi^2$  检验或 Fisher 精确检验。等级资料两组间比较采用 Mann-Whitney  $U$  检验, 组内比较采用多个相关资料的 Friedman 检验。  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

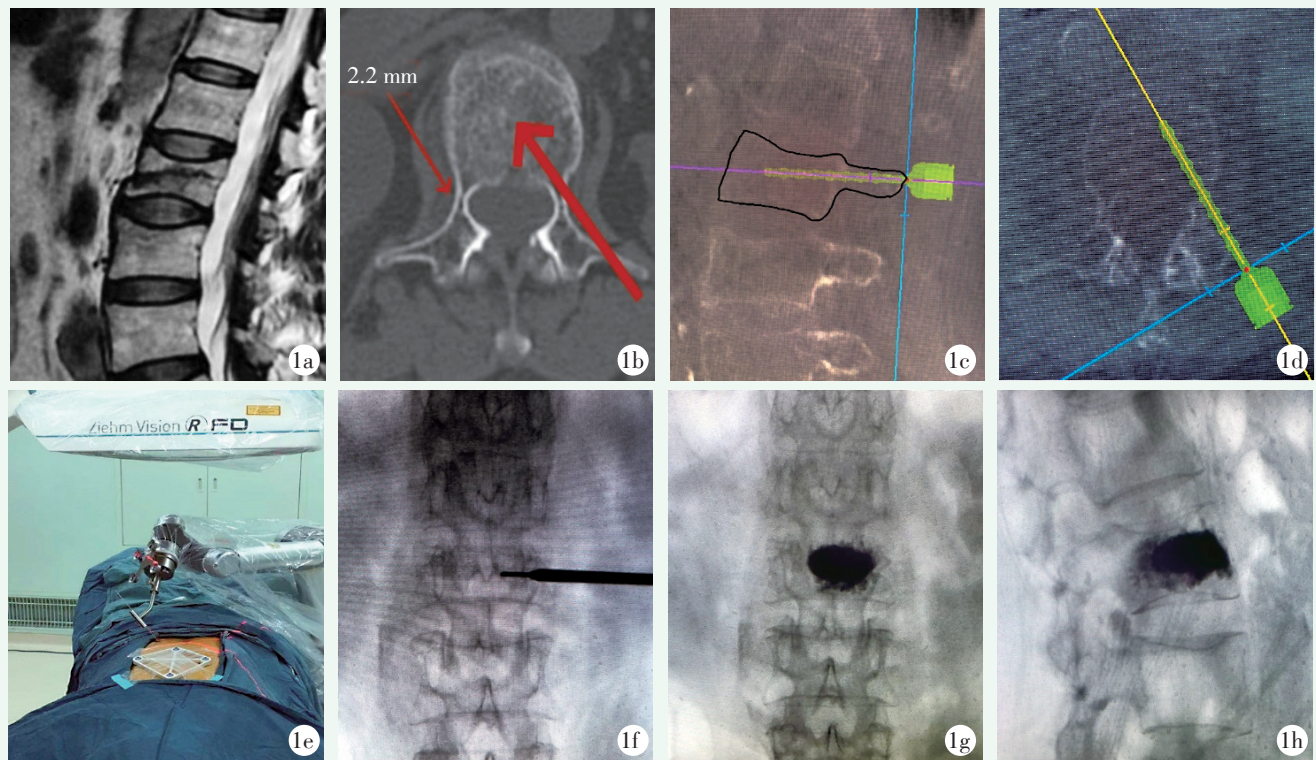


图 1 患者, 女, 61 岁, L<sub>2</sub> 椎体压缩性骨折。1a: 术前 MRI 见 L<sub>2</sub> 椎体压缩性骨折; 1b: 术前 CT 测量椎弓根直径约 2.2 mm (细箭头), 粗箭头为椎弓根外穿刺路径; 1c, 1d: 术中三维重建后设计穿刺路径; 1e: 天玑机器人的机械臂引导穿刺; 1f: 置入穿刺针及工作套管; 1g, 1h: 透视见骨水泥弥散良好。

Figure 1. A—61 years-old female suffered from L<sub>2</sub> osteoporotic vertebral compression fracture. 1a: Preoperative MRI showed a compression fracture of the L<sub>2</sub> vertebra; 1b: The diameter of the pedicle measured by CT was measured about 2.2 mm (thin arrow), and the thick arrow revealed the outside pedicle puncture path; 1c, 1d: The puncture path was designed after the 3D reconstruction; 1e: The robotic arm with Tianji robot guides was used for puncture; 1f: The puncture needle and the working cannula were placed under fluoroscopy; 1g, 1h: The fluoroscopes in anteroposterior and lateral positions revealed bone cement disseminated well.

## 2 结果

### 2.1 围手术期资料

两组患者均顺利完成手术, 围手术期资料见表 2。机器人组手术时间显著长于透视组 ( $P < 0.05$ ), 但机器人组术中透视次数显著少于透视组 ( $P < 0.05$ )。两组穿刺成功率、骨水泥渗漏率、下地行走时间、住院天数的差异均无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。按偏离术前规划通道  $> 2$  mm 认为穿刺失败, 机器人组为 2 例, 透视组为 6 例穿刺。机器人组 3 例出现骨水泥渗漏, 2 例椎旁渗出, 1 例椎前渗出。透视组有 5 例骨水泥

渗漏, 1 例渗入椎管 (少许渗出, 无神经症状), 3 例椎旁渗出, 1 例渗漏至椎间隙。没有出现脊髓神经损伤、血管栓塞, 毒性反应等严重并发症。

### 2.2 随访结果

两组患者均获得 12 个月以上的有效随访, 随访时间 12~35 个月, 平均 (19.8±5.7) 个月。随访资料见表 3。两组恢复完全负重活动时间的差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。术后随时间推移, 两组患者 VAS、ODI 评分均显著减少 ( $P < 0.05$ ), 相应时间点, 两组间 VAS、ODI 评分的差异均无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。两组术后腰背部疼痛及功能障碍均获得明显改善。

表 2 两组患者围手术期资料比较

Table 2 Comparison of perioperative documents between the

two groups

指标	机器人组 (n=18)	透视组 (n=25)	P 值
手术时间 (min, $\bar{x} \pm s$ )	43.5±5.2	26.2±4.9	<0.001
穿刺透视次数 (次, $\bar{x} \pm s$ )	3.3±0.8	8.8±3.3	<0.001
穿刺成功率 [例 (%)]	16 (88.9)	19 (76)	0.284
骨水泥渗漏率 [例 (%)]	3 (16.7)	5 (20)	0.782
下地行走时间 (d, $\bar{x} \pm s$ )	1.7±0.9	1.5±0.8	0.256
住院天数 (d, $\bar{x} \pm s$ )	6.3±2.2	5.6±1.7	0.086

表 3 两组患者随访资料 ( $\bar{x} \pm s$ ) 比较

Table 3 Comparison of follow-up documents between the two

groups ( $\bar{x} \pm s$ )

指标	机器人组 (n=18)	透视组 (n=25)	P 值
恢复完全负重活动时间 (d)	23.6±4.8	24.8±6.7	0.164
VAS 评分 (分)			
术前	6.3±1.2	6.8±1.0	0.129
术后 3 d	3.4±1.0	3.4±1.2	0.824
术后 3 个月	1.7±1.3	1.4±1.1	0.318
末次随访	1.7±1.1	1.4±1.4	0.056
P 值	<0.001	<0.001	
ODI 评分 (%)			
术前	74.3±7.1	72.3±6.4	0.262
术后 3 d	31.3±6.1	30.6±5.5	0.606
术后 3 个月	16.8±8.7	15.4±9.4	0.577
末次随访	9.7±7.9	9.8±8.1	0.650
P 值	<0.001	<0.001	

### 2.3 影像评估

两组患者影像评估结果见表 4。两组骨水泥分布优秀率比较差异无统计学意义 ( $P>0.05$ )。与术前相比, 两组患者术后 3 d 及末次随访时, 局部后凸 Cobb 角显著减小 ( $P<0.05$ ), 椎体前缘相对高度显著增加 ( $P<0.05$ )。相应时间点, 两组间上述指标的差异均无统计学意义 ( $P>0.05$ )。

## 3 讨论

经椎弓根穿刺入路作为传统的经典手术入路, 穿刺针经天然的骨性通道进入椎体, 不易损伤神经根或节段血管。但缺点是受解剖结构限制, 尤其是胸椎椎弓根横径短, 矢状径狭长, 经椎弓根穿刺内倾角一般不超过  $20^\circ$  [12], 穿刺针很难达到中线。骨水

泥填充常偏向一侧或刚达到椎体中部, 对侧骨水泥弥散不理想, 易因椎体受力不均匀导致再次塌陷及局部侧凸畸形 [13]。如强行增加内倾角度, 可能损伤椎弓根内壁, 进入椎管, 导致神经损伤或骨水泥渗漏入椎管等更大风险。上腰椎 ( $L_{1/2}$ ) 椎弓根解剖接近胸椎, 也存在同样的问题。双侧经椎弓根穿刺可以解决这个问题, 但同时存在增加手术时间和并发症的风险 [14], 目前一般使用较少, 多用作单侧骨水泥灌注不良的一种适度补充。

表 4 两组患者影像资料 ( $\bar{x} \pm s$ ) 比较

Table 4 Comparison of imaging documents between the two

groups ( $\bar{x} \pm s$ )

指标	机器人组 (n=18)	透视组 (n=25)	P 值
骨水泥分布优秀率 [例 (%)]	15 (83.3)	19 (76)	0.734
局部后凸 Cobb 角 ( $^\circ$ )			
术前	18.6±4.4	16.9±4.6	0.157
术后 3 d	5.7±1.8	5.5±1.7	0.610
末次随访	4.3±2.1	4.3±1.8	0.856
P 值	<0.001	<0.001	
椎体前缘相对高度 (%)			
术前	64.2±14.1	62.7±12.6	0.517
术后 3 d	82.8±9.8	82.0±8.3	0.093
末次随访	79.7±9.0	79.2±7.9	0.244
P 值	<0.001	<0.001	

为了摆脱椎弓根对穿刺的影响, 学者们在不断探索椎弓根外穿刺路径。临床应用较多的有胸椎的肋-横突间隙入路, 腰椎的经横突椎弓根外入路, 最近还有单侧后上方入路的文献报道 [15]。胸椎经肋骨-横突间隙进入 [16], 于椎弓根和椎体连接处穿刺进入椎体, 不经椎弓根, 内倾角度可达  $30^\circ \sim 45^\circ$ , 穿刺针很容易达到或超过椎体中线, 骨水泥分布更合理 [17]。腰椎可以经横突-椎弓根外缘-椎体入路穿刺, 同样可以避开椎弓根。椎弓根外入路缺点就是可能损伤节段血管或神经 [18], 为了避开节段动脉及神经根, 进针点应位于椎弓根中线之上, 穿过横突, 紧贴椎弓根外壁进入椎体。因此精准的定位和操作是手术成功的关键。

传统透视法在定位和安装导针时为了选择最佳的穿刺点和角度, 需要反复透视进行调整, 非常考验术者的手术技巧和耐心。机器人导航辅助手术, 可在三维立体图像上规划设计最佳的穿刺路线, 然后在机械臂的引导下置入导针, 亚毫米级的精确度

可保证穿刺的成功<sup>[19]</sup>。整个过程仅需透视3次,术前定位、环形扫描及术后验证。因其极高的准确性,整个流程一般可一次完成,极大提高手术操作的简便性。尤其在多节段手术时,这一优势更加明显。美中不足的是操作略显繁琐,需要调整设备,扫描图像、设计钉道。使用初期会感觉不如传统透视方法简便,尤其是单节段手术增加了额外的时间成本。熟练使用后,这一过程会明显缩短。

机器人的准确性有时会受周围环境因素的干扰<sup>[20]</sup>,因此操作中需要注意一些问题:(1)定位信号的遮挡:机器人定位依靠机械臂和患者身上的示踪器与光学追踪平台之间的光信号传播,因此在操作时需注意避免遮挡光信号传播通路;(2)信号漂移:示踪器和骨性结构恒定的相对位置是准确定位的基础,如不慎触碰示踪器会导致信号漂移影响定位。信号漂移后表现为所有钉道向同一个方向等距离位移。误差过大的话需要重新定位扫描;(3)安装导针时工作套筒易受软组织牵拉,导致定位不准确。张力大时可先稍松解软组织,使套筒处于无应力状态;(4)呼吸频率过快会在扫描时影响成像效果,呼吸幅度过大,各椎体节奏不一致,也会导致信号漂移。在胸椎时该现象会比较明显。本研究机器人组2例穿刺误差较大,可能因示踪器固定不稳定信号漂移所致。

机器人辅助手术已在临床上有一定应用,但目前总体来说,较多研究证实临床疗效和手术安全性方面与传统方法没有太大区别<sup>[21]</sup>。但作为一项新生的技术,应抱谨慎乐观的态度。

#### 参考文献

- [1] 《中国老年骨质疏松症诊疗指南2023》工作组,中国老年学和老年医学学会骨质疏松分会,中国医疗保健国际交流促进会骨质疏松病学分会,等.中国老年骨质疏松症诊疗指南(2023)[J].中华骨与关节外科杂志,2023,16(10):865-885. DOI: 10.3969/j.issn.2095-9958.2023.10.01. Chinese Guidelines for the Diagnosis and Treatment of Senile Osteoporosis 2023 Working Group, Osteoporosis Branch of Chinese Society of Gerontology and Geriatrics, Osteoporosis Branch of China Association for the Promotion of International Healthcare Exchange, et al. Chinese Guidelines for the diagnosis and treatment of osteoporosis in the elderly (2023) [J]. Chinese Journal of Bone and Joint Surgery, 2023, 16 (10) : 865- 885. DOI: 10.3969/j.issn.2095-9958.2023.10.01.
- [2] 中华医学会骨质疏松和骨矿盐疾病分会.原发性骨质疏松症诊疗指南(2022)[J].中华骨质疏松和骨矿盐疾病杂志,2022,15(6):573-611. DOI: 10.3969/j.issn.1674-2591.2022.06.001. Osteoporosis and Bone Mineral Salt Disease Branch of Chinese
- [3] 中国医师协会骨科学分会脊柱创伤专业委员会.急性症状性骨质疏松性胸腰椎压缩骨折椎体强化术临床指南[J].中华创伤杂志,2019,35(6):481-489. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-8050.2019.06.001. Spinal Trauma Professional Committee of Branch of Orthopedics of Chinese Medical Doctor Association. Clinical guidelines for vertebral augmentation for acute symptomatic osteoporotic thoracolumbar compression fracture [J]. Chinese Journal of Trauma, 2019, 35 (6) : 481-489. DOI: 10.3760/cma.J.issn.1001-8050.2019.06.001.
- [4] Zuo XH, Zhu XP, Bao HG, et al. Network meta-analysis of percutaneous vertebroplasty, percutaneous kyphoplasty, nerve block, and conservative treatment for nonsurgery options of acute/subacute and chronic osteoporotic vertebral compression fractures (OVCFs) in short-term and long-term effects [J]. Medicine (Baltimore), 2018, 97 (29) : e11544. DOI: 10.1097/MD.00000000000011544.
- [5] 马航展,贺少杰,谢一心,等.骨质疏松性椎体骨折不同复位程度椎体成形比较[J].中国矫形外科杂志,2023,31(20):1854-1859. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.20.06. Ma HZ, He SJ, Xie YX, et al. The comparison of vertebral shape in osteoporotic vertebral fractures with different reduction degrees [J]. Orthopedic Journal of China, 2023, 31 (20) : 1854-1859. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.20.06.
- [6] 盛朝辉,李田珂,王健军,等.单侧与双侧穿刺后凸成形术治疗骨质疏松性胸腰椎骨折的比较[J].中国矫形外科杂志,2018,26(12):1094-1097. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2018.12.08. Sheng ZH, Li TK, Wang JJ, et al. Comparison of unilateral and bilateral puncture kyphoplasty in the treatment of osteoporotic thoracolumbar fracture [J]. Orthopedic Journal of China, 2018, 26 (12) : 1094-1097. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2018.12.08.
- [7] 张亚,辛兵.两种入路椎体成形术治疗骨质疏松性压缩骨折比较[J].中国矫形外科杂志,2021,29(16):1519-1522. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.16.18. Zhang Y, Xin B. Comparison of two approaches to vertebroplasty in the treatment of osteoporotic compression fractures [J]. Orthopedic Journal of China, 2021, 29 (16) : 1519- 1522. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.16.18.
- [8] Zhuo Y, Liu L, Wang H, et al. A modified transverse process-pedicle approach applied to unilateral extrapedicular percutaneous vertebroplasty [J]. Pain Res Manag, 2021, 2021: 6493712. DOI: 10.1155/2021/6493712.
- [9] Clark W, Bird P, Gonski P, et al. Safety and efficacy of vertebroplasty for acute painful osteoporotic fractures (VAPOUR): a multicenter, randomised, double-blind, placebo-controlled trial [J]. Lancet, 2016, 388: 1408-1416. DOI: 10.1016/S0140-6736(16)31341-1.
- [10] Boszczyk BM, Bierschneider M, Hauck S, et al. Transcostovertebral kyphoplasty of the mid and high thoracic spine [J]. Eur Spine

- J, 2005, 14 (10) : 992-9. DOI: 10.1007/s00586-005-0943-1.
- [11] 俞武良, 陆建猛, 韦勇力, 等. 经皮椎体成形术中椎体内骨水泥分布范围对疗效的影响 [J]. 中国矫形外科杂志, 2015, 23 (20) : 1836-1840. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2015.20.03.  
Yu WL, Lu JM, Wei YL, et al. The influence of bone cement distribution on the therapeutic effect of percutaneous vertebroplasty [J]. Orthopedic Journal of China, 2015, 23 (20) : 1836-1840. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2015.20.03.
- [12] Verma V, Santoshi JA, Jain V, et al. Thoracic pedicle morphometry of dry vertebral columns in relation to trans-pedicular fixation: a cross-sectional study from Central India [J]. Cureus, 2020, 12 (5) : e8148. DOI: 10.7759/cureus.8148.
- [13] Jacobson RE, Nenov A, Duong HD. Re-expansion of osteoporotic compression fractures using bilateral spinejack implants: early clinical experience and biomechanical considerations [J]. Cureus, 2019, 11 (4) : e4572. DOI: 10.7759/cureus.4572.
- [14] Xiong XM, Sun YL, Song SM, et al. Efficacy of unilateral transverse process-pedicle and bilateral puncture techniques in percutaneous kyphoplasty for Kummell disease [J]. Exp Ther Med, 2019, 18 (5) : 3615-3621. DOI: 10.3892/etm.2019.7980.
- [15] 王焯锋, 顾晨希, 黄安全, 等. 单侧经后外上方入路椎体成形术治疗骨质疏松性椎体压缩性骨折 [J]. 国际骨科学杂志, 2021, 42 (4) : 247-251. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7083.2021.04.012.  
Wang YF, Gu CX, Huang AQ, et al. Treatment of osteoporotic vertebral compression fracture by unilateral posterior external and upper approach vertebroplasty [J]. International Journal of Orthopaedics, 2019, 42 (4) : 247-251. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7083.2021.04.012.
- [16] Ringer AJ, Bhamidipaty SV. Percutaneous access to the vertebral bodies: a video and fluoroscopic overview of access techniques for trans-, extra-, and infrapedicular approaches [J]. World Neurosurg, 2013, 80 (3-4) : 428-435. DOI: 10.1016/j.wneu.2012.09.005.
- [17] Rapan S, Krnić K, Rapan V, et al. Application of high viscosity bone cement in vertebroplasty for treatment of painful vertebral body fracture [J]. Med Glas (Zenica), 2016, 13 (2) : 148-53. DOI: 10.17392/842-16.
- [18] Heo DH, Cho YJ. Segmental artery injury following percutaneous vertebroplasty using extrapedicular approach [J]. J Korean Neurosurg Soc, 2011, 49 (2) : 131-133. DOI: 10.3340/jkns.2011.49.2.131.
- [19] 张冶, 董岩, 郭松, 等. 天玑骨科机器人辅助经皮椎体成形术 [J]. 中国矫形外科杂志, 2022, 30 (9) : 835-838. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.09.14.  
Zhang Y, Dong Y, Guo S, et al. Tianji orthopedic robot-assisted percutaneous vertebroplasty [J]. Orthopedic Journal of China, 2022, 30 (9) : 835-838. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.09.
- [20] Fan Y, Du JP, Liu JJ, et al. Accuracy of pedicle screw placement comparing robot-assisted technology and the free-hand with fluoroscopy-guided method in spine surgery: An updated meta-analysis [J]. Medicine (Baltimore), 2018, 97 (22) : e10970. DOI: 10.1097/MD.00000000000010970.
- [21] Yu L, Chen X, Margalit A, et al. Robot-assisted vs freehand pedicle screw fixation in spine surgery- a systematic review and a meta-analysis of comparative studies [J]. Int J Med Robot, 2018, 14 (3) : e1892. DOI: 10.1002/rcs.1892.

(收稿:2023-12-22 修回:2024-03-05)

(同行评议专家: 黄勇, 胡昊, 魏坦军, 朱晓彬)

(本文编辑: 闫承杰)