

机器人辅助经皮植钉微创姑息治疗脊柱转移瘤的临床研究

王 姗, 林 书, 李佳鸿, 周 际, 杨 林, 唐六一

四川省医学科学院·四川省人民医院(电子科技大学附属医院)骨科, 四川 成都 610072

【摘要】 目的 探讨机器人辅助经皮植钉微创姑息治疗晚期脊柱转移瘤的临床效果。方法 分析 2018 年 1 月至 2023 年 7 月我院 112 例晚期脊柱转移瘤患者的病历资料,按照手术方式分为经皮组 65 例和开放组 47 例。对比两组患者脊柱肿瘤不稳定性评分(SINS)、Tokuhashi 评分、视觉模拟评分法(VAS)、日本骨科协会评估治疗分数(JOA)、神经功能改善情况、围手术期指标及相关并发症情况。结果 近期疗效看,经皮组手术时间、切口长度、术中失血量、术后住院时间及输血率、并发症发生率均低于开放组($P<0.05$);远期疗效看,两组术后 1 月 VAS 评分、JOA 评分均优于术前,且经皮组 VAS 评分、JOA 评分明显优于开放组($P<0.001$)。两组植钉准确性均较高。结论 机器人辅助经皮植钉微创手术在治疗晚期脊柱转移瘤中,相比传统开放或 C 臂引导手术,具有植钉准确率高、辐射低、手术时间短、并发症少等优势,可有效缓解疼痛并促进神经功能恢复,临床疗效良好。

【关键词】 机器人;经皮;微创;姑息;脊柱转移瘤

【中图分类号】 R738.1

【文献标志码】 A

【文章编号】 1672-6170(2026)03-0185-05

Clinical study of minimally invasive palliative treatment of spinal metastases with robot-assisted percutaneous nail implantation WANG Shan, LIN Shu, LI Jia-hong, ZHOU Ji, YANG Lin, TANG Liu-yi Department of Orthopedics, Sichuan Academy of Medical Sciences & Sichuan Provincial People's Hospital (Affiliated Hospital of University of Electronic Science and Technology of China), Chengdu 610072, China

【Corresponding author】 LIN Shu

【Abstract】 **Objective** To explore the clinical efficacy of minimally invasive palliative treatment with robot-assisted percutaneous nail implantation for advanced spinal metastases. **Methods** Medical records of 112 patients with advanced spinal metastases in our hospital from January 2018 to July 2023 were analyzed. The patients were divided into a percutaneous group ($n=65$) and an open group ($n=47$) based on surgical methods. Spinal Instability Neoplastic Scale (SINS), Tokuhashi score, Visual Analogue Scale (VAS), Japanese Orthopaedic Association Scores (JOA), neurological function improvement, perioperative indicators and related complications were compared between the two groups. **Results** In terms of short-term efficacy, the operation time, incision length, intraoperative blood loss, postoperative hospital stay, transfusion rate and complication rate in the percutaneous group were lower or shorter than those in the open group ($P<0.05$). In terms of long-term efficacy, the VAS and JOA scores of both groups after one month of surgery were better than before surgery, and the VAS and JOA scores of the percutaneous group were significantly better than those of the open group ($P<0.001$). Both groups of nail planting had high accuracy. **Conclusions** Compared to conventional open or C-arm-guided surgery, robot-assisted percutaneous minimally invasive nail placement for advanced spinal metastases has several advantages. The advantages are high nail placement accuracy, low radiation exposure, short operative time and few complications. It effectively alleviates the pain and promotes the neurological recovery. Its clinical outcomes are good.

【Key words】 Robotics; Percutaneous; Minimally invasive; Palliative; Spinal metastases

随着我国人口老龄化加速,晚期脊柱转移肿瘤发病率显著上升^[1]。该病常侵犯脊柱后柱等结构,引起剧烈疼痛、活动受限甚至瘫痪,使其难以接受后续抗肿瘤治疗^[2]。若肿瘤包绕脊髓,患者还可能失去放疗机会,进一步影响生存^[3]。传统开放手术创伤大、并发症多、恢复慢,难以满足姑息治疗需求^[4]。为减少创伤,经皮椎弓根螺钉固定技术自 2005 年起逐渐应用于晚期患者,但传统 C 臂引导操作难度大、术者辐射暴露高,尤其在上胸椎区域风险显著,限制了其推广应用^[5,6]。近年来,骨科手术

机器人凭借精准定位和稳定操作,在脊柱微创领域取得进展,显著降低了手术难度与辐射剂量^[7,8],但该技术应用于脊柱转移瘤微创姑息固定中的应用仍缺乏系统研究。本研究回顾性分析机器人辅助经皮固定治疗晚期脊柱转移瘤的临床疗效,以探索更安全高效的姑息治疗策略。

1 资料与方法

1.1 一般资料 2018 年 1 月至 2023 年 7 月我院 112 例晚期脊柱转移瘤患者。纳入标准:①椎管占位且病变节段位于 T5~L4 单病灶的脊柱肿瘤;②脊柱肿瘤不稳定性评分(spinal instability neoplastic score, SINS)^[9]>7 分。排除标准:①Tokuhashi 评分^[10]>11 分与身体状况不适合手术;②无须椎管扩大减压的脊

【基金项目】 四川省科技厅科技支撑项目(编号:2023YFS0189)

【通讯作者】 林 书

柱肿瘤。按照患者手术方式分为经皮组 65 例和开放组 47 例,两组基线资料比较,差异无统计学意义($P>$

0.05)。见表 1。研究方案经四川省人民医院医学伦理委员会批准,伦理批号:2019 年第 298 号。

表 1 患者基线资料比较

项目	经皮组($n=65$)	开放组($n=47$)	统计量	P	
性别(男/女, n)	31/34	24/23	$\chi^2=0.124$	0.725	
年龄(岁)	60.6±10.2	61.2±10.6	$t=0.101$	0.899	
BMI (kg/m^2)	20.8±2.7	21.1±2.8	$t=0.784$	0.102	
病变节段[$n(\%)$]	T5~T10	26 (40.0)	18 (38.2)	$\chi^2=0.034$	0.983
	T11~L1	20 (30.8)	15 (31.9)		
	L2~L4	19 (29.2)	14 (29.7)		
原发肿瘤类型[$n(\%)$]	肺部肿瘤	28 (43.1)	21 (44.6)	$\chi^2=3.015$	0.389
	肝癌	16 (24.6)	17 (36.1)		
	前列腺癌	7 (10.8)	3 (6.3)		
	其他	14 (21.5)	6 (12.7)		
评分系统(分)	SINS 评分	11.3±2.1	11.2±2.5	$t=0.124$	0.852
	Tokuhashi 评分	7.9±1.6	7.8±1.2	$t=0.131$	0.841

1.2 方法 经皮组采用机器人(第三代中国骨科机器人“天玑”系统)辅助经皮椎弓根螺钉固定手术:首先通过 C 臂 X 射线机(德国西门子医疗系统有限公司生产的 ARCADIS Orbic 3D 系统或其他常规 C 臂)确认目标节段并消毒铺巾。固定光学跟踪器后行 270°三维扫描,于导航工作站完成椎弓根三维重建、最优穿刺路径计算(误差 <0.5 mm)及安全通道验证。随后机械臂引导下经 0.5 cm 切口植入导向套筒,使用 1.5 mm 骨导针精确穿刺至预设深度(30±2) mm。透视验证后序贯完成攻丝、经皮椎弓根螺钉植入及跨节段固定(覆盖病椎上下各 2~3 个节段),并行单侧钛棒临时固定。该技术通过三维规划与机械臂导向控制置钉精度。本研究采用的机器人辅助微创手术方案,其核心流程始于术前的精准三维规划。基于脊柱 CT 三维重建图像,可清晰识别椎体骨质破坏区域,评估脊柱稳定性;结合 T2 加权磁共振矢状位图像,显示椎体信号异常及脊髓受压情况,为神经功能障碍提供影像学诊断依据。在术中阶段,首先利用机器人导航工作站对三维扫描数据进行处理,完成椎弓根螺钉通道的规划,系统自动生成误差小于 0.5 mm 的最优钉道。随后,机械臂依据规划路径自动定位并锁定,稳定引导术者经皮置入导针至预设深度;继而沿导针顺序完成扩孔与经皮椎弓根螺钉的植入。在完成可靠的经皮内固定后,再于病变节段行正中微创切口,切除部分椎板及肿瘤组织,从而实现彻底的椎管减压,解除对脊髓的压迫。术中 X 射线片可验证内固定物位置,脊柱序列与力线。

开放组采用椎弓根螺钉固定手术:透视定位后行后正中切口显露棘突、椎板、关节突和横突。在减压节段的上下至少 2 个节段徒手植入椎弓根螺钉固定。

脊柱肿瘤切除(附加操作):根据固定螺钉平面定位病椎范围。微创切开并剥离至椎板,切除病变棘突、椎板暴露硬脊膜,清除病灶组织送检。根据椎体后壁破坏情况决定是否经椎弓根路径行骨水泥强化。彻底止血后留置引流管,逐层缝合切口。术后常规予抗感染、镇痛及康复治疗。

1.3 观察指标 ①记录患者围手术期指标,包括手术时间、术中失血量以及由 C 臂 X 射线机所测得的术中累积辐射剂量(单位: cGy/cm^2)。②采用视觉模拟评分(visual analogue scale, VAS)评估患者术前及术后 1 个月的疼痛程度^[11]。该评分范围为 0~10 分,0 分表示无痛,1~3 分表示轻度疼痛(不影响睡眠),4~6 分表示中度疼痛(可能影响睡眠),7~10 分表示重度疼痛。③应用日本骨科协会(japanese orthopaedic association, JOA)评分^[7]评估患者术前及术后神经功能,总分 0~29 分,分值越高代表神经功能状态越好。④术后通过脊柱 CT 扫描,依据 Gertzbein-Robbins 分级标准评估椎弓根螺钉植入的准确性^[12]。A 级:螺钉完全位于椎弓根皮质内;B 级:皮质破坏 <2 mm;C 级:破坏 2~4 mm;D 级,破坏 4~6 mm;E 级,破坏 >6 mm。其中 A 级与 B 级被定义为植钉位置满意,而 C、D、E 级为不满意;植钉准确率以满意(A+B 级)螺钉数量占总螺钉数的百分比计算。

1.4 统计学方法 应用 SPSS 13.0 统计学软件对数据进行分析。计量资料以均数±标准差表示,组间比较采用 t 检验;计数资料用例数(%)描述,组间比较采用 χ^2 检验。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组手术指标比较 所有患者均获随访,随访时间 8~22 个月,中位随访时间为 10 个月。经皮组手术时间、切口总长度、术中失血量、输血比例及术

后住院时间均低于开放组 ($P < 0.001$), 开放组术中放射剂量低于经皮组 ($P < 0.001$)。见表 2。

表 2 两组围手术期指标比较

项目	经皮组 ($n=65$)	开放组 ($n=47$)	t	P
手术时间 (min)	163.5±28.2	212.3±35.2	21.568	0.000
切口总长度 (cm)	9.7±1.5	25.3±3.5	25.151	0.000
术中失血量 (ml)	287.9±65.9	575.1±236.2	10.142	0.000
术中放射剂量 (cGy/cm ²)	209.7±42.1	156.2±35.3	9.214	0.000
术后住院时间 (天)	5.6±0.99	15.2±3.6	26.212	0.000
输血情况 [$n(\%)$]	11(16.9)	21(44.6)	22.25	0.000

2.2 两组术中及术后并发症情况比较 经皮组总体并发症发生率显著低于开放组 ($\chi^2 = 5.305, P < 0.001$)。见表 3。

2.3 两组疼痛与神经功能评分比较 两组术前 VAS 评分和 JOA 评分比较, 差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。术后 1 个月时, 两组 VAS 评分和 JOA 评分均较术前显著改善, 且经皮组改善程度均显著优于开放组 ($P < 0.001$)。见表 4。

表 3 两组并发症情况比较 [$n(\%)$]

并发症	经皮组 ($n=65$)	开放组 ($n=47$)
切口感染	2(3.1)	3(6.3)
肺部感染	3(4.6)	5(10.6)
轻度肠梗阻	1(1.5)	3(6.3)
尿路感染	1(1.5)	2(4.2)
总并发症	7(10.7)	13(27.6)

表 4 两组 VAS 评分和 JOA 评分比较 (分)

项目	指标	经皮组	开放组	t	P
VAS 评分	术前	5.09±1.27	5.01±1.34	0.262	0.895
	术后 1 月	2.52±0.75*	3.65±1.12*	-3.121	<0.001
JOA 评分	术前	14.86±1.67	15.12±1.66	0.351	0.567
	术后 1 月	20.23±2.20*	17.11±1.56*	5.123	<0.001

* 与术前比较, $P < 0.001$

2.4 两组植钉准确性比较 经皮组总共植入 656 枚椎弓螺钉, 准确率 93.7%, 其中 521 枚 A 级 (79.4%), 94 枚 B 级 (14.3%), 39 枚 C 级, 2 枚 D 级, 无 E 级螺钉。开放组总共植入 471 枚椎弓螺钉, 准确率 91.0%, 其中 364 枚 A 级 (占 77.2%), 65 枚 B 级 (占 13.8%), 27 枚 C 级, 15 枚 D 级, 无 E 级螺钉。两组螺钉准确率比较, 差异无统计学意义 ($\chi^2 = 3.475, P = 0.062$)。

3 讨论

近年来, 随着恶性肿瘤诊疗水平的进步, 患者生存期得到显著延长^[13, 14]。在此背景下, 脊柱转移瘤患者的生存质量日益受到重视, 亟需优化外科干预策略^[15, 16]。传统开放手术常需 30~40 cm 长切口, 伴随较大组织创伤、较长恢复周期, 并可能延误后续系统性抗肿瘤治疗。本研究所有患者均采用统一的机器人辅助经皮植钉联合微创减压技术。该系列操作系统性地体现了本方案核心理念: 即通过术前精准规划与术中机械臂的稳定引导, 构建一个标准化的微创手术流程。该流程有效整合了高精度的经皮螺钉固定技术与充分的椎管减压术, 旨在一次手术中同步解决晚期脊柱转移瘤所导致的脊柱力学不稳和神经压迫这两个核心临床问题, 展现了该技术对于目标患者群体兼具可重复

性、安全性及有效性。

临床研究发现, 术中出血量是评估围手术期安全性的重要指标, 与输血需求及并发症风险密切相关^[16]。国际研究显示, 微创技术可有效控制术中出血; Zairi 等^[17]采用可扩张通道系统实施微创减压, 在缩小切口的同时实现了有效出血控制。需要明确的是, 脊柱转移瘤外科治疗的主要目标为椎管减压以缓解脊髓压迫, 而非追求肿瘤全切, 该理念已成为临床共识^[18-20]。本研究中, 微创技术将平均失血量控制在 (287.9±65.9) ml, 远低于开放组的平均失血量 (575.1±236.2) ml, 且输血率降至 16.9%, 显著低于开放手术的 44.6%, 这对术前常合并贫血的脊柱转移瘤患者具有重要临床意义。

微创外科治疗遵循双重目标: 首要缓解疼痛、改善生活质量; 其次重建脊柱稳定性, 纠正肿瘤性骨破坏导致的生物力学失衡。然而, 经皮椎弓根螺钉技术存在显著学习曲线, 尤其在胸椎节段, 且术中反复透视会延长手术时间并增加医患辐射暴露^[21-24]。Morgen 等^[19]研究证实, 尽管微创减压可减少出血, 但可能相应延长手术时间。值得注意的是, 美国国家科学院报告指出^[20], 即使低剂量电离辐射也可能造成生物分子损伤并增加潜在风险。

随着骨科手术机器人技术的成熟, 其在胸腰椎

骨折和退行性病变治疗中的应用日益广泛。林书等^[7]研究表明,机器人辅助经皮手术相较于传统 C 臂透视引导,可显著缩短手术时间并降低辐射剂量。前期研究一致显示,机器人辅助经皮螺钉植入的准确性显著高于传统透视技术。本研究共植入 656 枚椎弓根螺钉,植钉准确率达 93.7%,与文献报道相当。Lieberman 等^[24]指出,机器人引导使椎弓根螺钉放置准确性提高 58%,同时显著降低神经损伤风险、术者辐射暴露及手术时间,实现了精度、安全性与效率的同步优化。

Vardiman 等^[25]研究进一步佐证了本研究的植钉准确性。Smith^[26]报道的早期连续 56 例机器人手术显示,即使包含学习曲线病例,A/B 级螺钉比例仍达 97.7%。特别注意的是,该结果在平均 BMI 达 31 kg/m² 的肥胖人群中实现——此类患者因解剖标志模糊,传统手术误置风险显著增加。更重要的是,348 枚螺钉中仅 2 枚(0.6%)因位置偏差需术中调整,且无螺钉相关并发症发生,这与本组零神经损伤的结果共同印证了机器人技术的安全优势。

骨科手术并发症的发生与手术创伤程度、患者基础状况及术后功能恢复等多因素相关^[27-30]。本研究并发症发生率为 10.7%,低于传统开放手术报道的 12.3%~40.1%^[27,28]。值得注意的是,并发症中肺部感染占 4.6%(3/65),分析认为与晚期肿瘤患者的免疫功能抑制状态、胸椎手术对呼吸功能的影响及术后卧床等因素密切相关^[27,28]。近期一项前瞻性多中心随机对照研究证实,针对择期手术患者的术前物理治疗干预可使术后肺部并发症发生率降低 52%^[30],提示预防措施的重要性。

本研究中,患者术后 JOA 评分与 VAS 评分较术前均有显著改善。机器人辅助微创手术使患者能够更早下床活动,促进功能恢复。其对椎旁肌组织的损伤较小,具有促进术后快速康复的优势,同时可缩短住院时间,使患者能更早接受后续抗肿瘤治疗。然而,由于脊柱转移瘤患者病情复杂、个体差异大,设置同期对照组存在病例匹配难度,此为研究局限性之一。

综上所述,机器人辅助经皮内固定微创治疗晚期脊柱转移瘤,相较于传统术式,凭借其高植钉准确性、可控的辐射剂量、较少的术中失血及较低的并发症发生率,能有效缓解疼痛、改善神经功能,为晚期脊柱转移瘤患者提供了安全有效的治疗选择,尤其在提升生活质量和促进快速康复方面展现显著优势。尽管本研究存在单中心回顾性设计、随访时间有限等不足,但初步证实了该技术的临床价

值。未来通过多中心前瞻性研究、延长随访周期及优化成本效益比,有望进一步推动该技术的规范应用。

【参考文献】

- [1] Murotani K, Fujibayashi S, Otsuki B, et al. Prognostic factors after surgical treatment for spinal metastases[J]. *Asian Spine J*, 2024,18(3):390-397.
- [2] Heinig S, Aigner T, Bloß HG, et al. Spinal and cervical nodal metastases in a patient with glioblastoma [J]. *Strahlenther Onkol*, 2024,200(9):838-843.
- [3] Chen Y, Qin S, Zhao W, et al. MRI feature-based radiomics models to predict treatment outcome after stereotactic body radiotherapy for spinal metastases[J]. *Insights Imaging*, 2023,14(1):169.
- [4] Silva A, Yurac R, Guiroy A, et al. Low implant failure rate of percutaneous fixation for spinal metastases: a multicenter retrospective study[J]. *World Neurosurg*, 2021,148:e627-e634.
- [5] Lee JO, Kim DH, Chae HD, et al. Assessing visibility and bone changes of spinal metastases in CT scans: a comprehensive analysis across diverse cancer types [J]. *Skeletal Radiol*, 2024,53(8):1553-1561.
- [6] Nakanishi K, Uchino K, Watanabe S, et al. Effect of minimally invasive spine stabilization in metastatic spinal tumors[J]. *Medicina (Kaunas)*, 2022,58(3):129-136.
- [7] 林书, 胡珏, 万仑, 等. 机器人与透视辅助经皮椎弓根螺钉置入的比较[J]. *中国矫形外科杂志*, 2020,28(20):1830-1834.
- [8] 朱振中, 郑国焱, 张长青. 机器人辅助技术在创伤骨科的发展与临床应用[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2022,36(8):915-922.
- [9] 范志松, 邢栋, 杨朝旭, 等. 基于 SINS 评分的手术治疗对于脊柱转移瘤患者的意义[J]. *肿瘤防治研究*, 2017,44(8):544-547.
- [10] 王玉珠, 祖佳宁, 由长城, 等. Tomita 及改良 Tokuhashi 结合脊柱肿瘤不稳评分在脊柱转移瘤患者治疗决策中的可信度和可重复性研究[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2017,27(9):800-805.
- [11] 于美琪, 张磊, 陈天鑫, 等. 急性踝关节扭伤致距骨挫伤三期中药外治方案的早期临床疗效观察[J]. *中国骨伤*, 2025,38(8):835-841.
- [12] Gertzbein SD, Robbins SE. Accuracy of pedicular screw placement in vivo[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1990,15(1):11-14.
- [13] 赵雄伟, 曹叙勇, 刘耀升. 脊柱转移瘤微创手术的研究进展[J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2022,15(7):554-560.
- [14] Hao L, Chen X, Chen Q, et al. Application and development of minimally invasive techniques in the treatment of spinal metastases [J]. *Technol Cancer Res Treat*, 2022,21:15330338221142160.
- [15] Shiber M, Kimchi G, Knoller N, et al. The evolution of minimally invasive spine tumor resection and stabilization: from k-wires to navigated one-step screws [J]. *J Clin Med*, 2023,12(2):238-247.
- [16] 孟磊, 张贯林, 李东风, 等. “天玑”骨科手术机器人辅助下经皮椎弓根钉内固定治疗胸腰椎骨折的疗效观察[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2022,37(7):705-708.
- [17] Zairi F, Arikat A, Allaoui M, et al. Minimally invasive decompression and stabilization for the management of thoracolumbar spine metastasis[J]. *J Neurosurg Spine*, 2012,17(1):19-23.