

doi:10.3969/j.issn.1006-9852.2024.03.012

3D 打印导板在射频联合硬膜外置管镇痛治疗 腰椎术后疼痛综合征中的应用

彭 欣¹ 董珉光¹ 王丽娜¹ 高 翔² 李 航² 孙婧璇¹ 陈柯鑫¹ 陈建平^{2△}⁽¹⁾ 山西医科大学麻醉学院, 太原 030001; ⁽²⁾ 山西医科大学第三医院 (山西白求恩医院 山西医学科学院) 疼痛科, 太原 030032)

腰椎术后疼痛综合征 (failed back surgery syndrome, FBSS) 是指在一次或多次腰、骶椎手术后出现的持续性或反复发作的慢性疼痛^[1]。有研究表明 10%~40% 的腰椎融合内固定术后病人会发生 FBSS^[2], 持续的腰骶部、下肢疼痛严重影响病人生活质量。FBSS 发病机制复杂, 目前较公认的原因包括神经根牵拉损伤、间盘再突出、硬膜外瘢痕粘连及炎症刺激等^[3]。采用单纯的介入治疗往往远期疗效欠佳^[4,5], 由于腰椎术后病人正常生理结构改变, 且受内固定植入物影响, 解剖结构变得复杂^[6], 使得穿刺难度大^[7,8]、穿刺时间长、术中 CT 辐射剂量大, 对医患都造成潜在的损害, 所以实现精准穿刺、减少穿刺损伤并减少 CT 辐射具有重要意义。近年来, 3D 打印技术已应用于经皮三叉神经穿刺、经椎椎间孔镜等多个领域, 通过个体化导航从而实现精准穿刺^[9-11]。本研究应用 3D 打印导板辅助脉冲射频联合硬膜外置管镇痛术治疗 FBSS, 并对其安全性及有效性进行评价。

方 法

1. 一般资料

本研究为回顾性研究, 研究方案通过山西白求恩医院伦理委员会审核 (伦理批号 YXLL-2023-207), 术前病人均签署知情同意书。收集自 2022 年 5 月至 2023 年 5 月在山西白求恩医院疼痛科接受脉冲射频联合硬膜外置管镇痛术治疗 FBSS 病人共 40 例, 其中采用常规 CT 引导下穿刺手术的病人 20 例 (A 组), 采用 3D 打印模板导航辅助手术的病人 20 例 (B 组)。两组病人性别、年龄、病程、病变节段数、术前视觉模拟评分法 (visual analogue scale, VAS) 评分及术前日本骨科协会腰痛评分量表 (Japanese orthopaedic association, JOA) 评分差异

均无统计学意义 (见表 1)。

纳入标准: ①有腰椎融合内固定手术史; ②有 2~3 个节段的神经根刺激症状; ③保守治疗 3 个月无效者。

排除标准: ① CT 或 MRI 提示脊柱不稳、骨性椎管狭窄、脊髓严重受压等有明确开放手术指征; ②症状表现与影像学不一致; ③身体基本情况差不能耐受手术; ④凝血功能障碍; ⑤穿刺部位皮肤感染或全身感染等。

2. 治疗过程

(1) 3D 打印个体化导航模板制作与打印:

① CT 数据获取: B 组病人术前行俯卧位 CT 薄层扫描, 腹部垫枕, 在背部拟施手术椎体节段附近贴定位电极片 (3 个, 见图 1A), CT 扫描范围要求覆盖目标穿刺节段及电极片区域, 获取 CT 影像的 DICOM 格式。②数据处理: 利用 MIMICS 21.0 软件行腰椎和皮肤的三维重建。根据术前综合评估, 找到目标椎间孔处神经根脉冲射频靶点 (诱发根性症状的责任节段) 以及硬膜外穿刺靶点, 利用半径 1 mm 的圆柱体结构模拟穿刺针, 将虚拟穿刺针放置到合适位置即为虚拟穿刺路径, 旋转三维模型从各个方位观察虚拟路径的空间位置, 避开血管、内固定螺钉及骨质, 选择最优的穿刺路径 (见图 2)。测量虚拟穿刺路径与皮肤交点到靶点的距离, 即穿刺深度, 以及硬膜外穿刺点到目标置管靶点的长度。③穿刺导板的设计与打印: 设计贴合皮肤的模板, 需覆盖定位电极片以及虚拟穿刺针道, 制作虚拟穿刺针道同圆心的穿刺引导柱结构, 然后经过运算获得带有中空穿刺引导柱的个性化穿刺导航模板, 并以 STL 格式导出, 最后通过 3D 打印机快速打印成型^[12], 封装, 低温等离子消毒, 备用。

(2) 手术过程: 所有病人手术均在本院 CT 室进行, 且均由同一主任医师操作。入室后病人俯

△ 通信作者 陈建平 sxcjp2011@163.com

表 1 两组病人一般资料比较

变量	A 组 (<i>n</i> = 20)	B 组 (<i>n</i> = 20)	<i>t</i> / χ^2	<i>P</i>
性别 (男/女)	13/7	9/11	1.616	0.204
年龄 (年)	58.7±6.9	59.5±6.7	0.346	0.731
病程 (月)	13.4±5.0	11.6±3.3	1.375	0.177
病变节段数 (2 个节段/3 个节段)	7/13	6/14	0.114	0.736
术前 VAS 评分	5.8±1.0	6.0±1.0	-0.623	0.537
术前 JOA 评分	15.8±2.9	16.6±2.6	-0.967	0.340

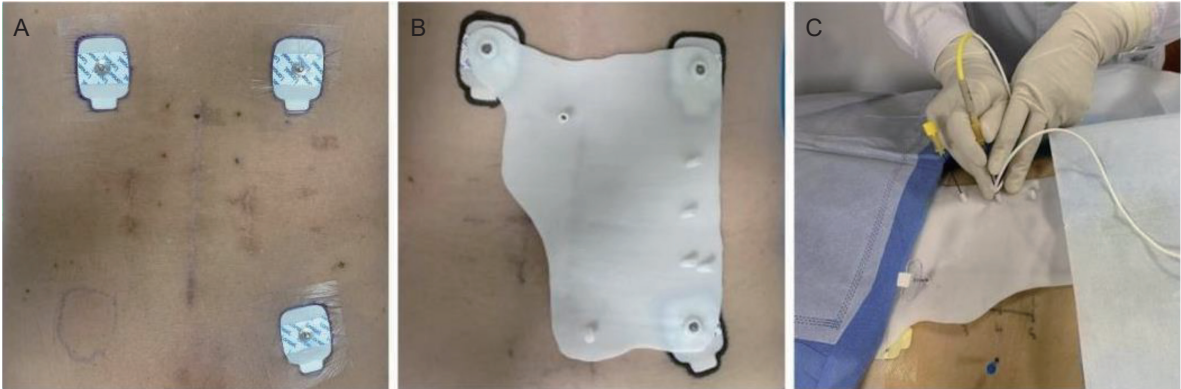


图 1 3D 打印导板辅助穿刺
(A) 背部贴 3 个定位电极片; (B) 3D 打印导板与定位电极片紧扣; (C) 3D 打印导板辅助下的脉冲射频治疗

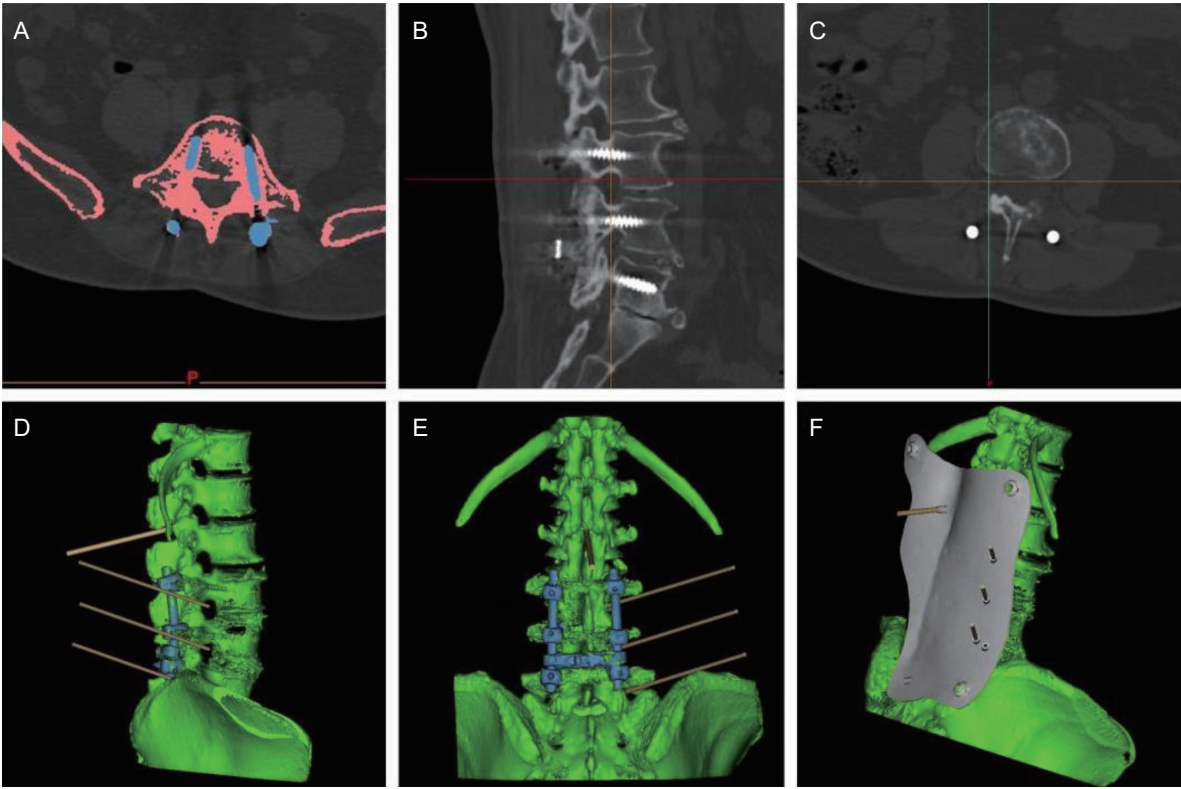


图 2 3D 打印导板制作示意图
(A) 利用 MIMICS 软件提取所需骨质; (B) 脉冲射频靶点 (十字交叉点): 矢状面腰椎 CT 图像, 位于椎间孔上 1/3; (C) 脉冲射频靶点 (十字交叉点): 横断位面 CT 图像; (D) 矢状位虚拟穿刺路径; (E) 后前位虚拟穿刺路径; (F) 软件中导航模板制作完成图

卧于 CT 扫描床上, 腹部垫枕, 开放静脉通路, 给予血压、脉氧、心电监护。

A 组: 常规消毒、铺单, 通过体表标志常规定位, 给予穿刺点局部麻醉, 保留局部麻醉针头, 行 CT 薄层扫描手术区域及针头位置, 依据 CT 图像指导改用射频针进针, 利用 CT 图像验证穿刺到位情况, 术中改变进针方向即行 1 次 CT 扫描, 注意避开内固定螺钉, 最终达到: ①脉冲射频靶点: 脉冲射频针尖位于目标椎间孔腹侧上 1/3; ②硬膜外穿刺靶点: 穿刺针到达硬膜外腔, 置管到靶节段。

B 组: 病人入室后, 复原术前 CT 扫描时的体位, 腹部垫枕, 定位电极片表面贴膜, 常规消毒, 铺巾, 将无菌的 3D 打印导板孔位与对应电极片位置吻合, 同时使导板底部与背部皮肤贴合紧密 (见图 1B), 局部麻醉后将射频针沿穿刺引导柱缓慢进针至预先测量好的穿刺深度, 行 1 次 CT 扫描, 针尖到达术前预设穿刺靶点。如未到达, 则根据 CT 影像进行微调, 直至穿刺到位 (见图 3)。

(3) 脉冲射频治疗: CT 确认穿刺到位后, 取出穿刺针芯, 回抽无血无液, 连接射频电极 (见图 1C), 行感觉和运动测试 (感觉测试采用 0.5 V 以内、50 Hz 复制出相应神经支配区域疼痛, 运动测试采用 1.0 V 以内、2 Hz 诱发相应区域肌肉跳动), 测试成功后行脉冲射频治疗, 设定温度 42℃, 频率 2 Hz, 20 ms, 时间 6 分钟。射频结束拔出电极, 每个靶点注入阻滞液 2 ml (1% 利多卡因 1 ml, 复方倍他米松 1 ml, 0.9% 氯化钠注射液稀释至 10 ml)。最后退出射频针, 按压片刻, 无菌敷贴保护创口。

(4) 硬膜外置管: 负压检测到达硬膜外, 注入碘海醇造影剂 1 ml 后行 CT 扫描, 显示针尖到硬膜外腔, 拔出针芯, 置入导管, 导管置入术前预设长

度后, 经导管注入碘海醇造影剂 1 ml, CT 扫描确定导管置入位置, 到达目标靶点后, 退针, 固定硬膜外导管, 贴无菌敷贴, 术后返回病房连接泵注装置, 药液 (盐酸罗哌卡因注射液 100 mg, 地塞米松 20 mg, 0.9% 氯化钠注射液 186 ml) 持续泵注, 背景剂量 2 ml/h, bolous 每次 2 ml, 锁定时间 30 分钟, 极限量每小时 10 ml, 术后根据病人情况调整, 持续泵注至术后 1~2 周。

3. 疗效评价

记录病人手术时长 (经皮局部麻醉开始至手术结束拔出射频针的时间)、到达靶点的穿刺次数 (穿刺针到达靶点前, 退至皮下调整方向再次穿刺的总次数)、术中 CT 扫描次数、术中病人呻吟/体动发生情况、并发症情况, 以及治疗前 (T_0)、治疗后 2 周 (T_1)、1 个月 (T_2)、3 个月 (T_3) 时 VAS 评分和 JOA 评分。VAS 评分由一条 10 cm 的游动标尺组成, 一端为 0, 表示无痛; 另一端为 10, 表示剧烈疼痛, 病人在标尺上标出代表自己疼痛程度的相应位置。JOA 评分包括以下 4 部分: 主观症状: 腰背痛、腿痛兼/或麻刺痛、步态; 临床体征: 直腿抬高试验和加强试验、感觉障碍、运动障碍; 日常活动: 平卧翻身、站立、洗漱、前屈、坐位、举重物、行走; 膀胱功能。最高分为 29 分、最低分 0 分, 分值越低表示功能越差。

4. 统计学分析

采用 SPSS 25.0 统计软件进行数据分析。服从正态分布的计量资料以均数 $\pm$ 标准差 ($\bar{x} \pm SD$) 表示, 两组间比较采用独立样本 t 检验; 不服从正态分布的计量资料以中位数 (下四分位数, 上四分位数) 表示, 两组间比较采用 Mann-Whitney U 检验; 计数资料以频数 (百分比) 进行描述, 两组间比较

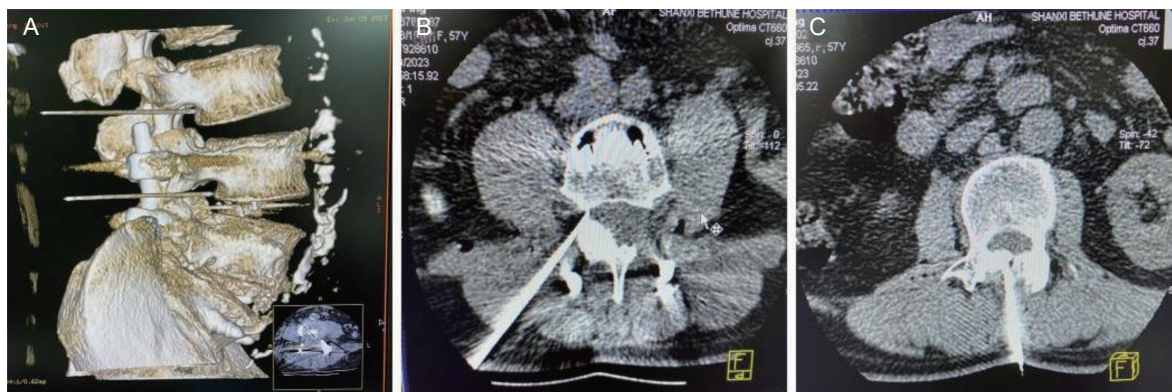


图 3 3D 打印导板辅助术中穿刺 CT 图像

(A) 术中三维图像: 3D 打印导板辅助下脉冲射频针到达指定靶点; (B) 术中冠状位 CT 图像: 穿刺针尖到达脉冲射频靶点; (C) 术中冠状位 CT 图像: 穿刺针尖到达硬膜外穿刺靶点

采用卡方检验和 Fisher 确切概率法；多个时间点的 VAS 和 JOA 评分比较采用重复测量方差分析。 $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

结 果

1. 两组病人术中情况比较

在手术时长方面，B 组用时明显少于 A 组 ($P < 0.001$)，B 组平均用时 (29.9 ± 5.7) 分钟，A 组平均用时 (58.0 ± 8.6) 分钟（见表 2）；在到达靶点的穿刺次数方面，B 组穿刺次数明显少于 A 组 ($P < 0.001$)；在 CT 扫描次数及辐射剂量方面，B 组平均照射次数为 (3.9 ± 1.3) 次、术中辐射剂量为 (759.7 ± 212.3) mGy·cm，A 组平均照射次数为 (11.4 ± 2.4) 次、术中辐射剂量为 (2377.0 ± 573.6) mGy·cm，B 组明显少于 A 组 ($P < 0.001$)；病人术中呻吟/体动发生情况 B 组明显少于 A 组 ($P < 0.01$)。

2. 两组病人 VAS 和 JOA 评分比较

术前两组的 VAS 和 JOA 评分比较差异无统计学意义。两组病人术后 VAS 评分均较术前明显降低 ($P < 0.05$)，术后 JOA 评分均较术前明显升高 ($P < 0.05$)，两组术后 2 周、1 个月、3 个月时间点的 VAS 和 JOA 评分差异均无统计学意义（见图 4）。

表 2 两组病人术中情况比较

组别	手术时长（分钟）	到达靶点的穿刺次数（次）	CT 扫描次数（次）	术中辐射剂量 (mGy·cm)	术中呻吟/体动
A 组 ($n = 20$)	58.0 ± 8.6	5 (5, 6)	11.4 ± 2.4	2377.0 ± 573.6	11 (55)
B 组 ($n = 20$)	$29.9 \pm 5.7^{###}$	2 (1, 2.75) ^{###}	$3.9 \pm 1.3^{###}$	$759.7 \pm 212.3^{###}$	2 (10) ^{##}
t/z	12.109	-5.432	11.948	11.825	-
P	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.01

^{##} $P < 0.01$ ，^{###} $P < 0.001$ ，与 A 组相比，“-” Fisher 确切概率法无检验值

3. 并发症及不良反应

A 组 1 例病人出现穿刺部位血肿。两组病人均未发生局部麻醉药中毒、神经根损伤、脑脊液漏、感染等严重不良反应及并发症。

讨 论

随着医学技术的发展，接受开放腰椎手术的病人越来越多，FBSS 的病入也逐年增加。对于 FBSS 病人，既往多采用手术治疗，但研究表明在第二、三、四次手术后改善率分别为 30%、15%、5%^[13]，改善率均未达到满意效果，且多数病人不愿接受再次翻修手术。近年来随着疼痛学科的发展，许多微创介入治疗（如射频热凝术、脉冲射频、脊髓电刺激、硬膜外阻滞等）为 FBSS 病人提供了创伤小、恢复快、风险小的介入治疗方式^[14,15]。目前单一的微创介入治疗并不足以长期改善病人的疼痛，本研究应用脉冲射频联合硬膜外置管镇痛治疗 FBSS，前者阻断疼痛传导通路并调控神经功能，后者充分抑制无菌性炎症及发挥液体剥离作用，两种技术优势充分结合，从而达到治疗 FBSS 的目的^[4,5,16,17]。

FBSS 病人在传统方式下行脉冲射频联合硬膜外置管镇痛术时，存在以下问题：①穿刺靶点多，

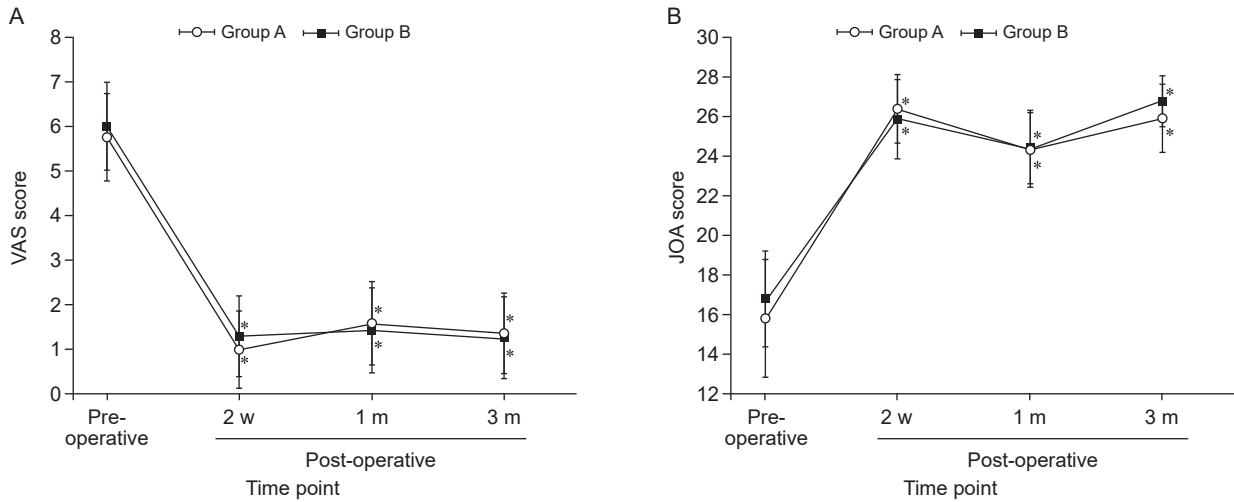


图 4 (A) 两组病人手术前后 VAS 评分比较；(B) 两组病人手术前后 JOA 评分比较

* $P < 0.05$ ，与术前相比



CT 辐射剂量大, FBSS 病人疼痛责任神经根节段多, 通常伴有 2 个以上的责任节段, 穿刺靶点及穿刺次数较普通腰椎间盘突出病人更多, 所需 CT 扫描次数随之增多。②结构变异, 腰椎术后病人多存在椎间孔狭窄、假关节病、横突大、骶髂关节遮挡等结构改变^[6], 影响正常穿刺路径, 导致术中重复穿刺次数明显增多, 且存在反复多次穿刺不能到达目标穿刺靶点最终穿刺失败的可能。③穿刺针需避开螺钉, Gazelka 等^[8]的研究显示射频套管与螺钉直接接触时, 射频产生的高温可使整个螺钉温度显著升高, 进而可能引起周围组织的损伤。④反复穿刺过程中也更容易导致神经损伤、出血、血肿、穿刺针误入椎管内、感染、终板炎等的发生率增加。因此术前获悉病人腰椎的具体形态位置, 科学规划穿刺路径及深度是提高 FBSS 病人微创手术成功率、降低并发症的重要环节。

本研究应用 3D 打印技术辅助手术穿刺, 研究结果显示, 两组病人在术中表现方面, 3D 打印导板辅助穿刺组明显缩短了手术时间, 减少了穿刺次数、CT 扫描次数、辐射剂量及术中异感发生率。A 组病人中有 1 例出现穿刺部位血肿, 未经特殊处理, 自行恢复。两组病人均未出现严重不良反应及并发症, 均具有较好的安全性。在疗效方面, 术后 2 周、1 个月、3 个月的 VAS 评分均较术前显著降低, JOA 评分均较术前明显升高, 但两组病人各时间点的评分差异均无统计学意义, 表明是否使用个性化导板技术对病人的预后无明显影响, 这与潘雪芹等^[12]的研究结果相同。

3D 打印导板是一种以数字模型文件为基础, 通过计算机技术, 进行数字化的精准手术设计, 应用 3D 打印技术加工为实体模板, 堪称手术设计的逆向工程产物^[16]。目前已广泛应用于生物学及外科领域, 在疼痛领域则应用较少^[18,19]。本研究应用 3D 打印导板辅助脉冲射频联合硬膜外置管镇痛术治疗 FBSS, 实现了对 FBSS 病人的个体化精准治疗。术前行腰椎 CT 平扫获得 DICOM 文件, 利用 MIMICS 软件对腰椎以及皮肤进行三维建模, 做到全方位观察病人腰椎形态结构, 精准定位穿刺靶点, 设计最优的穿刺路径, 预先测量所需穿刺及置管深度, 并建立穿刺引导柱结构, 然后制成贴合皮肤的导航模型, 最后通过 3D 打印光敏树脂生成个体化的导航模板实物^[20]。术中将导航模板与定位电极片紧扣, 保持导板与皮肤紧密贴合能够明显提高穿刺手术的准确性。3D 打印个性化导航模板的应用, 使原本复杂的手术过程变得简洁, 大大缩短了手术时间、减少了术中穿刺次数、CT 扫描次数及术中辐射剂量,

以及病人术中呻吟和体动的发生, 大大增加了病人对手术的满意度, 降低手术风险的同时保证了手术质量。该技术的应用加快了年轻医师的成长, 使年轻医师可以在短时间内掌握较复杂的穿刺技术且增加了手术的安全性。3D 打印经皮穿刺导板无需高精尖设备引导也能经皮精准抵达靶位、操作相对简单、费用较为低廉、安全性高、易于在临床广泛推广^[21]。

本研究的不足之处: 目前数据采集、导板设计、打印成品等过程需 1~2 天时间完成, 相对延长了术前准备时间, 今后研究中需要提高 MIMICS 模拟软件掌握程度; 本研究虽尽量复原术前体位, 但术中仍有变动可能, 部分病人需微调才能准确到达穿刺靶点, 需要进一步优化术前定位方法; 此外, 本研究样本数量较少, 随访时间较短, 远期疗效还需进一步研究。

综上所述, 采用 3D 打印导航模板辅助脉冲射频联合硬膜外置管镇痛术, 将个性化导航技术应用于临床手术操作, 能够有效地提高射频穿刺成功率、缩短手术时间、减少辐射暴露、降低手术风险、减轻病人痛苦, 具有良好的临床推广应用价值。

利益冲突声明: 作者声明本文无利益冲突。

参 考 文 献

- [1] Miller B, Gatchel RJ, Lou L, *et al.* Interdisciplinary treatment of failed back surgery syndrome (FBSS): a comparison of FBSS and non-FBSS patients[J]. *Pain Pract*, 2005, 5(3):190-202.
- [2] Kumar K, Taylor RS, Jacques L, *et al.* Spinal cord stimulation versus conventional medical management for neuropathic pain: a multicentre randomised controlled trial in patients with failed back surgery syndrome[J]. *Pain*, 2007, 132(1-2):179-188.
- [3] Sebaaly A, Lahoud MJ, Rizkallah M, *et al.* Etiology, Evaluation, and treatment of failed back surgery syndrome[J]. *Asian Spine J*, 2018, 12(3):574-585.
- [4] 李水清, 易端, 贾东林, 等. 背根神经节阻滞联合脉冲射频治疗腰椎术后根性疼痛的疗效及安全性评价[J]. *中国微创外科杂志*, 2020, 20(11):977-981.
- [5] 吴大胜, 刘炎, 刘娜, 等. 脉冲射频降低 NF- κ B 磷酸化水平治疗腰椎间盘突出症病人的疼痛[J]. *中国疼痛医学杂志*, 2020, 26(11):871-873.
- [6] Schofferman J, Reynolds J, Herzog R, *et al.* Failed back surgery: etiology and diagnostic evaluation[J]. *Spine J*, 2003, 3(5):400-403.
- [7] 周佳妮, 张娟, 陈剑. 腰椎内固定对后支射频治疗的不良影响 1 例[J]. *中国疼痛医学杂志*, 2022, 28(2):156-158.
- [8] Gazelka HM, Welch TL, Nassr A, *et al.* Safety of lum-



- bar spine radiofrequency procedures in the presence of posterior pedicle screws: technical report of a cadaver study[J]. *Pain Med*, 2015, 16(5):877-880.
- [9] Meng M, Wang J, Sun T, *et al*. Clinical applications and prospects of 3D printing guide templates in orthopaedics[J]. *J Orthop Translat*, 2022, 13; 34:22-41.
- [10] 张愈峰. 3D 打印导航板在椎间孔镜下腰椎髓核摘除术中的临床应用 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2019, 29(5): 444-448.
- [11] 连学辉, 肖红利, 卢涛, 等. 3D 打印体外导板辅助经椎弓根螺钉固定术治疗胸腰椎骨折的临床疗效观察 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2022, 32(8):704-712.
- [12] 潘雪芹, 王然, 赵定亮, 等. 3D 打印导板在胸段带状疱疹后神经痛背根神经节脉冲射频治疗中的应用 [J]. *中华医学杂志*, 2021, 101(43):3542-3548.
- [13] Chen YC, Lee CY, Chen SJ. Narcotic addiction in failed back surgery syndrome[J]. *Cell Transplant*, 2019, 28(3):239-247.
- [14] Rigoard P, Basu S, Desai M, *et al*. Multicolumn spinal cord stimulation for predominant back pain in failed back surgery syndrome patients: a multicenter randomized controlled trial[J]. *Pain*, 2019, 160(6):1410-1420.
- [15] Christopher R, Jamal H. High-frequency spinal cord stimulation salvages therapy in failed low-frequency treatment of failed back surgery syndrome[J]. *Neuromodulation*, 2023, 26(4):200.
- [16] 朱谦, 毛鹏, 胡宝良, 等. 硬膜外应用利多卡因和倍他米松治疗腰椎术后神经病理性疼痛 [J]. *中国疼痛医学杂志*, 2014, 20(4):222-225.
- [17] 汤达承, 黄穗翔, 叶婉仪, 等. 硬膜外自控镇痛联合臭氧介入治疗腰椎术后疼痛综合征下肢痛的临床疗效 [J]. *中国疼痛医学杂志*, 2018, 24(11):872-874, 877.
- [18] 张玲阁, 邓末宏, 龙星, 等. 3D 打印导板辅助射频温控热凝术治疗第 2 支三叉神经痛的临床研究 [J]. *华西口腔医学杂志*, 2018, 36(6):662-666.
- [19] 陆丽娟, 韩影, 槐洪波, 等. 3D 打印经皮穿刺导航系统在半月神经节射频热凝术中的应用 [J]. *中国疼痛医学杂志*, 2015, 21(12):914-918.
- [20] Li J, Lin J, Yang Y, *et al*. 3-Dimensional printing guide template assisted percutaneous vertebroplasty: Technical note[J]. *J Clin Neurosci*, 2018, 52:159-164.
- [21] 付军, 郭征, 王臻, 等. 多种 3-D 打印手术导板在骨肿瘤切除重建手术中的应用 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2014, 28(3):304-308.

• 国际译文 •

不同物种间疼痛特异性丘脑-皮质神经活动模式

寻找疼痛特异性神经元活动对于理解和控制疼痛具有重要的意义。丘脑是大多数感觉信号的上行中枢，其与大脑皮质的神经连接可能是处理不同感觉信息的基础。既往的动物研究表明，丘脑外侧核到初级和次级躯体感觉皮质（S1 和 S2）的外侧神经通路疼痛感觉的辨别处理相关，而丘脑内侧核与前额叶皮质和前扣带皮质（anterior cingulate cortex, ACC）的内侧神经通路疼痛刺激的情感-动机加工相关，但是人体内这两个通路是否特异性处理疼痛相关信息尚不明确。此外，在疼痛刺激传导中丘脑-皮质神经元活动的时间顺序以及有关疼痛特异性神经通路的临床转化价值也尚未揭示。以下是该研究要探索的三个问题。能否在人体中识别出疼痛特异性的丘脑反应和丘脑-皮质神经通路？能否在时间和空间两个维度识别丘脑神经元的疼痛特异性活动？上述神经活动能否在动物模型中得到验证？主要结果：（1）丘脑背内侧核（medial-dorsal, MD）被疼痛刺激特异性激活而不对其他感觉刺激产生反应，而丘脑腹后外侧核（ventral posterior lateral, VPL）被所有躯体感觉（如疼痛和触觉）特异性激活。（2）与电触觉刺激相比，疼痛刺激后的 MD 与背侧前扣带皮质（dorsal anterior cingulate cortex, dACC）和双侧岛叶的功能连接增强，VPL 与其他脑区之间的功能连接则没有显著变化。（3）在时间维度上，与 VPL 相关的外侧神经通路，在刺激后 65~159 ms 之间较早的开始处理与疼痛感觉辨别有关的信息，与 MD 相关的内侧神经通路在刺激后 89~295 ms 之间较晚的传递疼痛信息。（4）在动物模型（大鼠）中验证了疼痛刺激而不是电触觉刺激特异性激活 MD 神经元和 MD-ACC 的神经通路连接。结论：跨物种间存在趋同的疼痛特异性丘脑-皮质神经元活动。该研究可以指导未来的疼痛评估和管理策略。

（Tu Y, Li Z, Zhang L, *et al*. Pain-preferential thalamocortical neural dynamics across species. *Nat Hum Behav*, 2024, 8(1):149-163. 北京大学神经科学研究所，汪宇轩 邓敏智 译，刘风雨 校）