

脊柱内镜治疗退行性腰椎管狭窄症的技术进展与临床应用

孔繁道¹, 刘午阳^{2*}

¹赣南医学大学第一临床医学院, 江西 赣州

²赣南医学大学第一附属医院骨科, 江西 赣州

收稿日期: 2025年11月8日; 录用日期: 2025年12月1日; 发布日期: 2025年12月10日

摘要

退行性腰椎管狭窄症(Degenerative Lumbar Spinal Stenosis, DLSS)是一种常见的脊柱退行性疾病, 好发于中老年人群。其主要病理改变包括黄韧带肥厚、关节突关节增生及椎间盘突出等, 这些因素共同导致椎管有效容积减少, 进而压迫马尾神经和神经根, 引发神经源性间歇性跛行及相关神经功能障碍。虽然传统开放手术疗效明确, 但存在组织创伤大、术后恢复慢、手术效果不佳等问题。近年来, 以脊柱内镜技术为代表的微创术式在DLSS治疗中日益重要。本文系统综述了当前广泛应用的几种脊柱内镜术式, 包括椎间盘镜(MED)、单轴脊柱内镜(UES)、单侧双通道内镜(UBE)及单孔分体内镜(OSE), 并分析其技术特点、适应症与临床疗效。研究显示, 脊柱内镜手术在术中失血量、住院时间和术后功能恢复等围手术期指标上优于传统开放手术, 且远期疗效相当。文中还探讨了硬脊膜撕裂、神经根损伤、硬膜外血肿及术后感染等常见并发症的预防与处理措施, 强调精细解剖操作和实时神经功能监测对保障手术安全的关键作用。未来, 脊柱内镜技术有望进一步融合影像导航、人工智能及新型手术器械, 向更精准、微创和个体化方向发展, 为DLSS患者提供更优治疗方案。

关键词

退行性腰椎管狭窄症, 单侧双通道内镜, 脊柱内镜, 微创手术, 并发症

Technical Progress and Clinical Application of Spinal Endoscopy in the Treatment of Degenerative Lumbar Spinal Stenosis

Fandao Kong¹, Wuyang Liu^{2*}

¹First Clinical Medical College of Gannan Medical University, Ganzhou Jiangxi

²Department of Orthopedics, First Affiliated Hospital of Gannan Medical University, Ganzhou Jiangxi

*通讯作者。

文章引用: 孔繁道, 刘午阳. 脊柱内镜治疗退行性腰椎管狭窄症的技术进展与临床应用[J]. 临床医学进展, 2025, 15(12): 1410-1418. DOI: 10.12677/acm.2025.15123546

Received: November 8, 2025; accepted: December 1, 2025; published: December 10, 2025

Abstract

Degenerative Lumbar Spinal Stenosis (DLSS) is a common spinal degenerative disease, which is prone to occur in middle-aged and elderly people. The main pathological changes include thickening of the ligamentum flavum, hyperplasia of the facet joints and intervertebral disc protrusion, etc. These factors jointly lead to a reduction in the effective volume of the spinal canal, which in turn compresses the cauda equina nerve and nerve roots, causing neurogenic intermittent claudication and related neurological dysfunction. Although traditional open surgery has definite therapeutic effects, it has problems such as large tissue trauma, slow postoperative recovery and poor surgical outcomes. In recent years, minimally invasive surgical methods represented by spinal endoscopy have become increasingly important in the treatment of DLSS. This article systematically reviews several widely used spinal endoscopic procedures at present, including discoscopy (MED), uniaxial spinal endoscopy (UES), unilateral dual-channel endoscopy (UBE), and single-port split endoscopy (OSE), and analyzes their technical characteristics, indications, and clinical efficacy. Studies have shown that spinal endoscopic surgery is superior to traditional open surgery in perioperative indicators such as intraoperative blood loss, hospital stay and postoperative functional recovery, and the long-term efficacy is comparable. The article also discusses the prevention and treatment measures of common complications such as dural tear, nerve root injury, epidural hematoma and postoperative infection, emphasizing the key role of precise anatomical operation and real-time neurological function monitoring in ensuring surgical safety. In the future, spinal endoscopy technology is expected to further integrate image navigation, artificial intelligence and new surgical instruments, developing towards greater precision, minimally invasive and individualized directions, providing better treatment options for patients with DLSS.

Keywords

Degenerative Lumbar Spinal Stenosis, Unilateral Dual-Channel Endoscopy, Spinal Endoscopy, Minimally Invasive Surgery, Complications

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

退行性腰椎管狭窄症(Degenerative Lumbar Spinal Stenosis, DLSS)作为一种退行性病变,在中老年群体中较为常见,主要表现为腰部及下肢疼痛与功能受限。该病的病理机制主要涉及黄韧带增厚、小关节骨质增生及椎间盘退变突出等多种因素,这些改变共同造成椎管有效容积的缩小,进而对马尾神经和神经根形成压迫,最终导致神经源性间歇性跛行以及感觉、运动功能异常等一系列典型临床表现[1]。随着人口老龄化进程的不断加快,DLSS 的患病率呈现出明显增高的趋势,在脊柱外科领域,DLSS 已成为临床实践中的重点与难点。

尽管传统开放减压手术在治疗效果上得到了广泛认可,但其操作往往伴随较大的组织创伤、术中失血较多以及患者术后恢复周期较长等问题。在此背景下,脊柱内镜技术作为微创脊柱外科领域的一项关键技术,近年来发展迅速,并逐步成为治疗退变性腰椎管狭窄症(DLSS)的常用手段。该术式借助微创通

道置入内窥镜系统及配套手术工具,在高清放大视野的辅助下精准实施神经结构减压,从而在最大限度维持脊柱原有骨性解剖结构完整性与椎旁肌肉功能的同时,有效控制了手术并发症的发生风险[2]。目前主流术式包括椎间盘镜(MED)、单轴内镜(UES)、单侧双通道内镜(UBE)及单孔分体内镜(OSE)等,它们各具技术特点和适应范围,共同推动了 DLSS 治疗的微创化、精准化和个体化发展[3]。

多项高质量临床研究证实,对于退变性腰椎管狭窄症(DLSS),脊柱内镜疗法具有与开放手术相当的远期疗效。同时,该微创技术在改善围手术期指标(如降低术中失血量、减少住院天数)及提升术后康复速度方面,展现出明确的优越性[4]。因此,本文旨在系统梳理不同脊柱内镜技术的发展现状,分析其临床应用效果与并发症防治策略,并对未来发展方向进行展望,以期为临床实践提供参考。

2. 脊柱内镜技术的发展与应用现状

2.1. 椎间盘镜(MED)

椎间盘镜(Microendoscopic Discectomy, MED)技术由 Foley 和 Smith 于 1997 年首次提出,最初用于腰椎间盘突出症治疗,随后扩展至腰椎管狭窄症的治疗。Aihara 等研究验证了该技术在 DLSS 中的长期疗效可靠性[5]。MED 系统整合内镜放大视野与传统显微外科技术,通过直径约 16~18 mm 的工作通道经单侧入路完成双侧减压[6]。

MED 采用旁正中入路,距中线 1~1.5 cm 作约 2 cm 纵切口,将肌肉逐级扩张后置入金属工作通道中。在内镜视野下,先完成同侧减压,然后调整角度,将棘突基底及对侧部分椎板切除,实现双侧减压。这种跨中线切除黄韧带的方式有助于保留对侧肌肉韧带复合体,减少术后脊柱不稳的风险[7]。研究表明,MED 治疗 DLSS 的中长期疗效良好。Aihara 等对包括退变性滑脱的 DLSS 患者进行了超过 5 年的随访,发现 MED 组临床疗效优良率达 89.2%,与开放手术组无显著差异,但 MED 组术中出血量更少(平均 68 ml vs 193 ml),术后住院时间更短(42 小时 vs 94 小时) [5]。Suzuki 等的文献综述显示, MED 术后患者 JOA 评分改善率平均达 61.3%, ODI 评分显著降低, SF-36 生活质量评分在各维度均有明显提高[7]。

MED 的学习曲线较为陡峭,术者需要经过专门培训。Nomura 等研究表明,术者需完成约 30 例手术才能熟练掌握,初期并发症发生率较高,硬膜撕裂率可达 5.3%,但随着经验积累,并发症显著减少[8]。近年来, MED 与影像导航结合,实现术中实时三维定位,大幅提高了手术精准度。目前 MED 主要适用于单节段或双节段中央管狭窄,对严重关节突增生或椎间孔狭窄患者效果有限。

2.2. 单轴脊柱内镜(UES)

单轴脊柱内镜(Uniportal Endoscopic Surgery, UES)系统将照明、成像与操作通道集成于单一器械,经单一通道完成手术。UES 技术最初主要用于椎间盘突出症的治疗,随着器械改进和技术成熟,已逐渐应用于腰椎管狭窄症的治疗[9]。UES 根据入路不同分为经椎间孔入路和经椎板间入路两种方式,治疗 DLSS 多采用后路椎板间入路。

经椎板间 UES 技术采用中线或旁正中切口,长约 8 mm,置入工作套管后导入内镜。在盐水持续灌注下,使用镜下磨钻、咬骨钳等器械逐步切除部分椎板下缘和关节突内侧,显露并切除增厚的黄韧带,扩大中央椎管和神经根管。Wang 等研究表明,UES 治疗单节段 DLSS 手术时间约 65~90 分钟,出血量一般少于 50 ml,术后住院时间 2~4 天[2]。UES 的优势在于真正的“全程可视化”操作,内镜直接抵达手术区域,提供清晰放大视野,能精确区分神经组织和粘连组织,减少神经损伤风险。

对于多节段 DLSS,UES 也可通过单一切口或多个小切口完成减压。Yoshikane 等报道采用选择性单侧半椎板切除术治疗多节段 DLSS,术后患者 VAS 评分从 7.2 分降至 2.1 分, ODI 指数从 55.3%改善至 18.7%,疗效显著[10]。然而,UES 处理严重骨性狭窄、钙化严重的病例仍存在一定局限性,且学习曲线

陡峭, 术者需要具备扎实的开放手术基础和内镜操作经验。对于严重钙化韧带或复杂解剖变异的病例, UES 仍面临挑战。

2.3. 单侧双通道脊柱内镜(UBE)

单侧双通道脊柱内镜(Unilateral Biportal Endoscopy, UBE)是近年来在脊柱外科领域发展迅速的微创术式。该技术通过建立两个独立的工作通道, 一个通道用于内镜成像, 另一个则用于手术器械操作。这种双通道设计既保留了内镜手术的微创特点, 又使术者能够获得与开放手术相近的三维视野及器械操作自由度[11]。

UBE 技术一般使用两个 1cm 左右的切口。间距 2~3 cm。内镜通道置于尾侧, 器械通道置于头侧。在持续灌流下, 利用射频电极对软组织进行清理, 使椎板和黄韧带显露出来。随后以磨钻或骨凿切除部分椎板与关节突内侧, 切除增厚黄韧带, 扩大中央椎管和侧隐窝。UBE 能有效地处理各种类型的腰椎管狭窄中央管狭窄等[12]。Zhou 等的 Meta 分析显示, UBE 与显微镜下减压治疗 DLSS 的临床疗效相当, 但 UBE 组术中出血更少(平均 95 ml vs 145 ml), 术后住院时间更短(4.2 天 vs 6.5 天) [4]。

UBE 技术特别适用于复杂 DLSS 病例。Kang 等报道采用 UBE 技术治疗合并轻度滑脱的 DLSS 患者, 术后滑脱无进展, 临床疗效优良率达 86.7% [13]。对于高龄患者, Wu 等研究表明在局部麻醉下实施 UBE 手术安全有效, 避免了全身麻醉风险, 特别适合合并多种内科疾病的老年患者[14]。UBE 的另一个优势是学习曲线相对平缓, 特别是对已有开放手术经验的脊柱外科医生更容易掌握[15]。但 UBE 需要较高的灌注液管理技巧, 避免颅内压升高和相关并发症。

2.4. 单孔分体内镜(OSE)

单孔分体内镜(One-Portal Split Endoscopy, OSE)是最新发展的脊柱内镜技术, 其特点是使用单一入口但配备分体内镜系统, 允许同时使用多个器械操作。OSE 技术结合了 UES 的单孔优势和 UBE 的操作便利性, 被认为是脊柱内镜技术的重要创新[3]。

OSE 技术采用约 1.5 cm 的单一皮肤切口, 但内镜系统内部分为多个工作通道, 可同时容纳内镜和 2~3 个操作器械。这种设计允许术者在内部进行组织牵拉、吸引和切割等同步操作, 提高了手术效率。Li 等比较了 OSE 与 UBE 治疗 DLSS 的效果, 发现两组临床疗效相似, 但 OSE 组手术时间更短(75.6 分钟 vs 88.3 分钟), 术后早期腰痛 VAS 评分更低(2.1 分 vs 3.0 分) [3]。

OSE 技术在处理严重骨性狭窄方面展现优势。分体内镜设计允许使用更大尺寸的磨钻, 提高了骨性减压效率。同时, 内部牵引能力使术者能更好地处理粘连严重的病例, 减少硬膜撕裂风险。Zhang 等最新研究发现, OSE 术后患者椎间盘高度和椎间孔高度虽有轻微减少, 但腰椎稳定性未受显著影响, 临床疗效优良率达 89.4% [16]。新一代 OSE 系统集成 4K 成像技术和智能压力控制系统, 显著改善了手术视野清晰度和安全性。人工智能辅助 OSE 系统能够实时识别解剖结构, 自动规划最优减压路径, 进一步降低了手术风险[17]。然而, OSE 技术目前仍处于发展初期, 长期疗效和适用范围仍需更多研究验证[18]。目前主要适用于单节段或双节段 LSS, 对于多节段严重狭窄或需要 360 度减压的病例, 仍需更多技术改良和临床验证。

3. 脊柱内镜术式选择路径

根据 DLSS 的不同分型(中央管、侧隐窝、椎间孔狭窄)、节段数量、是否合并滑脱或不稳以及患者基础状况, 选择最合适术式的决策路径可归纳如下: 对于单节段中央管狭窄, 若以黄韧带肥厚为主、关节突增生不严重, 优先考虑单轴脊柱内镜(UES)或单孔分体内镜(OSE), 二者均可经椎板间入路实现高效中央管减压; 若合并双侧侧隐窝狭窄, 则单侧双通道内镜(UBE)因其双通道操作空间大, 能同时完成中央管

和双侧侧隐窝减压, 更为适合[4]。针对侧隐窝或椎间孔狭窄, 经椎间孔入路的 UES 可直接处理椎间孔区域, 而骨性增生明显时 UBE 或 OSE 能提供更佳骨性工作通道, 便于磨钻扩大神经根管。多节段狭窄(2~3 节段)优选 UBE, 因其镜下视野广、器械操作灵活, 适合多节段连续减压, 尤其对于老年、合并症多的患者可在局麻下实施[19]; 若多节段均为中央管狭窄, 也可采用椎间盘镜(MED)通过单一切口跨中线完成双侧减压, 但其学习曲线较陡。对于合并轻度滑脱(Meyerding I°~II°)但不伴明显不稳的病例, UBE 或 OSE 可在减压同时进行有限度的关节突成形, 部分研究显示其术后滑脱无进展; 若术前动态 X 线提示不稳, 则应联合融合手术。高龄、多合并症患者优先选择 UBE 或 UES, 因二者可在局麻/镇静下操作, 降低全麻风险[20]。严重钙化韧带或翻修手术推荐 UBE, 其双通道设计提供更佳视野和器械操作角度, 适合粘连重、解剖变异的复杂病例; 若设备允许, OSE 的分体内镜系统也能在单孔内实现多器械协同, 提升钙化组织处理效率。总之, 选择原则为: 单节段简单狭窄可选 UES 或 OSE; 多节段、复杂骨性狭窄优选 UBE; 合并轻度滑脱且不稳不显著可尝试 UBE/OSE; 高龄、高危患者优先局麻下 UBE/UES; 严重粘连、钙化病例推荐 UBE。

4. 并发症及其预防策略

脊柱内镜技术虽具微创优势, 但仍存在并发症风险。深入了解这些并发症的发生机制和预防策略, 对提高手术安全性至关重要。

4.1. 硬脊膜撕裂

硬脊膜撕裂是脊柱内镜手术中最常见的并发症, 发生率约为 1.9%~9.6% [21]。内镜手术中硬膜撕裂的危险因素包括: 既往同一节段手术史、严重椎管狭窄、黄韧带钙化、硬膜囊粘连以及术者经验不足。Tsutsumimoto 等前瞻性研究发现, 微内镜减压手术中 incidental dural tears 的发生率为 6.8%, 其中大部分发生在学习曲线初期[22]。

预防硬膜撕裂的关键在于精细操作和适当技术选择。手术操作时, 应优先使用高速磨钻而非 Kerrison 咬骨钳处理严重狭窄区域的骨质, 因咬骨钳插入可能进一步压迫本已狭窄的硬膜囊。对于黄韧带与硬膜严重粘连的病例, 可采用“由外向内”的切除技术: 先从椎板附着处分离黄韧带, 再向中线逐步切除, 避免直接牵拉硬膜[23]。术中持续冲洗保持视野清晰, 使用钝头吸引器适当牵引也有助于减少硬膜损伤风险。

一旦发生硬膜撕裂, 内镜下修复是首选方法。应根据裂口大小和位置采取相应处理措施。小型撕裂(<5 mm)可采用纤维蛋白胶封堵或脂肪肌肉移植覆盖。中型撕裂(5~10 mm)需使用内镜缝合器械进行连续缝合, 目前已有专为内镜设计的弯头缝合器械, 可在狭窄空间内完成 8 字缝合或连续缝合, 缝合时建议采用 4-0 或 5-0 不可吸收缝线, 从裂口远端向近端逐针缝合, 每针间距约 2 mm。对于大型撕裂(>10 mm)或复杂撕裂, 应及时中转显微镜辅助修复, 避免脑脊液漏长期不愈[24]。术后保持平卧位 24~48 小时, 预防性使用抗生素, 密切观察神经系统症状, 多数患者可顺利恢复, 无需二次手术[25]。

4.2. 神经根损伤

椎管内窥镜手术的严重并发症是神经根损伤, 发生率为 0.5%~3.2% [26]。神经根损伤可分为直接损伤(机械性损伤、热损伤)和间接损伤(过度牵引、长时间压迫)。运动神经根损伤可能导致足下垂等严重功能障碍, 感觉神经根损伤则导致相应皮节感觉异常或疼痛。

预防神经根损伤的关键在于清晰辨认神经解剖结构和精细操作。解剖层面, 必须清晰辨识“安全三角”(Kambin 三角)边界, 工作通道放置应在椎间孔外口, 避免进入椎管内[27]。在内镜视野中, 神经根通常呈珍珠白色, 表面有细微血管走行, 而黄韧带呈浅黄色, 质地较韧。使用钝头探针仔细分离粘连, 避免粗暴牵拉。射频电极使用时需保持与神经根的安全距离(>3 mm), 并选择低功率设置(通常<30 W), 避

免热损伤[28]。

动力磨钻使用需格外谨慎, 始终在直视下操作, 确保磨钻头远离神经组织。在处理侧隐窝和椎间孔区域时, 需注意神经根可能被突出的关节突或增生的韧带所压迫, 需先充分减压再尝试移动神经根。术中神经监测(IONM)有助于早期发现神经功能异常, 特别对于复杂病例或翻修手术具有重要价值[29]。若出现足趾或肢体抽动, 提示神经根受激惹, 需立即撤回器械, 局部应用冰盐水冲洗降温; 术后若确诊损伤, 尽早使用甲钴胺(1500 μg /日)联合神经生长因子(如鼠神经生长因子 18 μg 肌注)促进修复)。

4.3. 硬膜外血肿

硬膜外血肿是脊柱内镜手术后罕见但可能造成灾难性后果的并发症, 症状性硬膜外血肿发生率约为 0.1%~0.3%, 无症状性血肿发生率较高(约 20%~30%)[30]。危险因素包括: 术中出血控制不彻底、术后引流不充分、抗凝药物使用和高血压等。临床表现为术后剧烈疼痛、神经系统症状进行性加重, 甚至截瘫。

预防硬膜外血肿的核心在于术中彻底止血。采用射频双极电极凝固软组织出血点, 骨面出血以骨蜡封闭。硬膜外静脉丛出血可使用明胶海绵或纤维蛋白胶轻压止血[31]。手术结束前, 确保在直视下确认无活动性出血后再闭合切口。具体可采用“白椎板”试验: 骨性表面完全干燥无渗血, 硬膜外静脉丛无充盈。术后常规放置引流管 24 小时, 可显著降低血肿形成风险[32]。

Ikuta 等通过 MRI 研究发现, 微创内镜减压术后约 28% 的患者存在无症状性硬膜外血肿, 这些血肿通常在 4 周内自行吸收[33]。对于有症状的硬膜外血肿, 需紧急行 MRI 检查确认, 一旦确诊应尽快手术清除血肿减压, 延迟处理可能导致不可逆的神经功能损害。清除血肿时宜采用原切口进入, 吸除血块后以大量冰盐水冲洗, 仔细检查并电凝活动出血点; 术后加强凝血功能监测, 维持血压稳定。研究表明, 血肿清除时机与神经功能恢复直接相关, 12 小时内手术者功能恢复显著优于超过 24 小时者[34]。

4.4. 感染

脊柱内镜手术感染发生率显著低于开放手术, 约为 0.3%~1.2% [35]。感染风险与手术时间、术者经验、患者体质因素(如糖尿病、肥胖)相关。表浅感染以切口红肿、渗液为主要表现, 深部感染可能发展为椎间盘炎或硬膜外脓肿。需要严格遵循无菌原则才能预防感染。术中频繁冲洗不仅维持视野清晰, 也有助于降低细菌浓度。使用含碘伏溶液冲洗手术野可进一步降低感染风险, 碘伏浓度建议 0.35%~0.5%, 每 30 分钟更换冲洗液; 高危患者术后可预防性使用头孢唑林 1 g 静脉滴注。一旦发生感染, 应根据细菌培养结果选用针对性抗生素, 表浅感染可切开引流, 深部感染可能需要再次手术清创, 清创时保留内固定, 以脉冲灌洗系统彻底清除坏死组织; 术后根据药敏选择抗生素, 如万古霉素用于 MRSA 感染, 疗程至少 4~6 周。

4.5. 一过性感觉异常、头痛、减压不充分

一过性感觉异常发生率约 4.5%~10.5%, 多因神经根受手术操作刺激引起, 通常可在 4~12 周内自行缓解, 症状严重者可应用加巴喷丁或普瑞巴林对症治疗, 加巴喷丁从 300 mg/日起始, 分三次口服, 最大可增至 1800 mg/日; 若效果不佳换用普瑞巴林 75 mg/日, 渐增至 300 mg/日[36]。对于持续性症状, 是否有残留压迫或其他并发症需要进一步检查评估。术中电生理监测技术的进步显著降低了神经并发症风险, 体感诱发电位(SSEP)和运动诱发电位(MEP)联合监测可实时评估神经功能状态, 及时预警潜在损伤[37]。

头痛常见于经椎板间入路手术, 与灌洗液压力过高相关。控制灌洗液高度(低于手术平面 30~40 cm)、使用压力控制泵和间歇性释放脑脊液压力可有效预防[34]。

减压不充分是技术性并发症, 发生率约 3%~8% [38]。常见原因包括: 骨性减压范围不足、残留韧带压迫、对侧减压不充分以及节段选择错误。预防措施包括: 术前仔细阅片, 精确规划减压范围; 术中可通过动态探查: 屈伸、旋转工作通道确认神经根移动度>1 cm; 若有残留压迫, 立即扩大骨窗至关节突内

侧 1/3, 确保侧隐窝高度恢复 $>4\text{ mm}$, 确保神经根充分松解; 对于多节段狭窄, 需综合考虑临床症状和影像学表现, 确定责任节段[39]。

5. 总结与展望

脊柱内镜技术已成为治疗退行性腰椎管狭窄症(DLSS)的重要微创手段, 其临床效果与安全性得到广泛证实。然而, 为进一步提升该技术的精准性、安全性与适用范围, 未来研究应聚焦于以下几个具体且亟待解决的科学与临床问题:

5.1. 内镜术后脊柱生物力学变化与长期稳定性的关联

内镜减压虽能保留后方韧带复合体, 但对关节突切除程度、椎间高度变化及其对脊柱稳定性的长期影响尚不明确。可采用有限元分析结合前瞻性影像随访, 量化不同内镜术式后的椎间活动度、椎间盘应力分布, 并通过动态 X 线或负重 MRI 观察 5 年内是否出现滑脱进展或邻椎病, 为内镜与融合手术的适应症划分提供生物力学依据。

5.2. 导航/AI 辅助系统在 UBE 手术中的精准度与学习曲线影响

已有初步研究显示 O 臂导航辅助 UBE 可降低辐射剂量、提高置入精度。下一步应设计可行性研究, 比较传统 UBE 与导航/AI 辅助 UBE 在复杂解剖(如严重钙化、翻修病例)中的手术时间、减压完整度、硬膜撕裂率及学习曲线(术者操作次数至稳定水平)。可结合术中 3D 导航与术后 CT 验证减压范围, 并记录新手医师在模拟器及实际手术中的技能提升速度, 为智能辅助技术的普及提供依据。

5.3. 高龄与多合并症患者在内镜手术中的围术期管理路径优化

老年 DLSS 患者常伴有心血管、代谢性疾病, 目前 UBE/UES 在局部麻醉下的安全性数据仍有限。可开展实用型随机对照试验(pRCT), 对比局麻与全麻下 UBE 手术的心肺并发症发生率、术后谵妄、住院时长及 30 天内再入院率, 并制定针对高龄患者的标准化围术期评估与干预流程。

通过上述问题的深入研究, 脊柱内镜技术将逐步实现操作标准化、适应症精确化、并发症可控化, 从而为更多 DLSS 患者提供更安全、有效的个体化治疗方案。

参考文献

- [1] Katz, J.N., Zimmerman, Z.E., Mass, H. and Makhni, M.C. (2022) Diagnosis and Management of Lumbar Spinal Stenosis. *Journal of the American Medical Association*, **327**, 1688-1699. <https://doi.org/10.1001/jama.2022.5921>
- [2] Wang, L., Wang, T., Fan, N., Yuan, S., Du, P., Si, F., et al. (2023) Efficacy of Repeat Percutaneous Endoscopic Lumbar Decompression for Reoperation of Lumbar Spinal Stenosis: A Retrospective Study. *Journal of Pain Research*, **16**, 177-186. <https://doi.org/10.2147/jpr.s384916>
- [3] Li, T., Jiang, Q., Zhong, W., Zhu, T., Lu, Z. and Ding, Y. (2024) One-Hole Split Endoscope versus Unilateral Biportal Endoscopy for Lumbar Spinal Stenosis: A Retrospective Propensity Score Study. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **19**, Article No. 254. <https://doi.org/10.1186/s13018-024-04743-7>
- [4] Zhou, H., Wang, X., Chen, Z., Liu, W. and Luo, J. (2023) Unilateral Biportal Endoscopy versus Microscopic Decompression in the Treatment of Lumbar Spinal Stenosis: A Meta-Analysis. *Medicine*, **102**, e32756. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000032756>
- [5] Aihara, T., Endo, K., Suzuki, H., Kojima, A., Sawaji, Y., Urushibara, M., et al. (2021) Long-Term Outcomes Following Lumbar Microendoscopic Decompression for Lumbar Spinal Stenosis with and without Degenerative Spondylolisthesis: Minimum 10-Year Follow-Up. *World Neurosurgery*, **146**, e1219-e1225. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2020.11.131>
- [6] Murata, S., Minamide, A., Takami, M., Iwasaki, H., Okada, S., Nonaka, K., et al. (2021) Microendoscopic Decompression for Lumbar Spinal Stenosis Caused by Facet-Joint Cysts: A Novel Technique with a Cyst-Dyeing Protocol and Cohort Comparison Study. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **34**, 573-579. <https://doi.org/10.3171/2020.8.spine201209>

- [7] Suzuki, A. and Nakamura, H. (2022) Microendoscopic Lumbar Posterior Decompression Surgery for Lumbar Spinal Stenosis: Literature Review. *Medicina*, **58**, Article 384. <https://doi.org/10.3390/medicina58030384>
- [8] Nomura, K. and Yoshida, M. (2017) Assessment of the Learning Curve for Microendoscopic Decompression Surgery for Lumbar Spinal Canal Stenosis through an Analysis of 480 Cases Involving a Single Surgeon. *Global Spine Journal*, **7**, 54-58. <https://doi.org/10.1055/s-0036-1583943>
- [9] Wu, B., Xiong, C., Tan, L., Zhao, D., Xu, F. and Kang, H. (2020) Clinical Outcomes of MED and iLESSYS® Delta for the Treatment of Lumbar Central Spinal Stenosis and Lateral Recess Stenosis: A Comparison Study. *Experimental and Therapeutic Medicine*, **20**, Article No. 252. <https://doi.org/10.3892/etm.2020.9382>
- [10] Yoshikane, K., Kikuchi, K. and Okazaki, K. (2021) Clinical Outcomes of Selective Single-Level Lumbar Endoscopic Unilateral Laminotomy for Bilateral Decompression of Multilevel Lumbar Spinal Stenosis and Risk Factors of Reoperation. *Global Spine Journal*, **13**, 1350-1357. <https://doi.org/10.1177/21925682211033575>
- [11] Pao, J.L. (2021) A Review of Unilateral Biportal Endoscopic Decompression for Degenerative Lumbar Canal Stenosis. *International Journal of Spine Surgery*, **15**, S65-S71. <https://doi.org/10.14444/8165>
- [12] Choi, D.J. and Kim, J.E. (2019) Efficacy of Biportal Endoscopic Spine Surgery for Lumbar Spinal Stenosis. *Clinics in Orthopedic Surgery*, **11**, 82-88.
- [13] Kang, M.S., You, K.H., Choi, J.Y., et al. (2021) Minimally Invasive Transforaminal Lumbar Interbody Fusion Using the Biportal Endoscopic Techniques versus Microscopic Tubular Technique. *The Spine Journal*, **21**, 2066-2077. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2021.06.013>
- [14] Wu, T., Liu, D., Meng, F., Lu, J., Chen, Y. and Fan, Z. (2024) Awake Unilateral Biportal Endoscopic Decompression under Local Anesthesia for Degenerative Lumbar Spinal Stenosis in the Elderly: A Feasibility Study with Technique Note. *Clinical Interventions in Aging*, **19**, 41-50. <https://doi.org/10.2147/cia.s443792>
- [15] Heo, D.H., Lee, D.C. and Park, C.K. (2019) Comparative Analysis of Three Types of Minimally Invasive Decompressive Surgery for Lumbar Central Stenosis: Biportal Endoscopy, Uniportal Endoscopy, and Microsurgery. *Neurosurgical Focus*, **46**, E9. <https://doi.org/10.3171/2019.2.focus197>
- [16] Zhang, J., Yan, R., Xu, S., Shao, B. and Dou, Y. (2024) Short-Term Lumbar Disc and Lumbar Stability Changes of One-Hole Split Endoscope Technique Treatment of Spinal Stenosis. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **25**, Article No. 325. <https://doi.org/10.1186/s12891-024-07443-9>
- [17] Zhang, F., Ye, D., Zhang, W., Sun, Y., Guo, L. and Li, J. (2024) Efficacy of Lumbar Decompression under Large-Channel Spinal Endoscope in Elderly Patients with Segmental Lumbar Spinal Stenosis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **19**, Article No. 16. <https://doi.org/10.1186/s13018-023-04389-x>
- [18] Kang, T., Park, S.Y., Kang, C.H., et al. (2019) Is Biportal Technique/Endoscopic Spinal Surgery Satisfactory for Lumbar Spinal Stenosis Patients: A Prospective Randomized Comparative Study. *Medicine (Baltimore)*, **98**, e15451.
- [19] Kim, J.E. and Choi, D.J. (2018) Unilateral Biportal Endoscopic Decompression by 30° Endoscopy in Lumbar Spinal Stenosis: Technical Note and Preliminary Report. *Journal of Orthopaedics*, **15**, 366-371. <https://doi.org/10.1016/j.jor.2018.01.039>
- [20] Liang, J., Lian, L., Liang, S., Zhao, H., Shu, G., Chao, J., et al. (2022) Efficacy and Complications of Unilateral Biportal Endoscopic Spinal Surgery for Lumbar Spinal Stenosis: A Meta-Analysis and Systematic Review. *World Neurosurgery*, **159**, e91-e102. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2021.12.005>
- [21] Wang, B., He, P., Liu, X., Wu, Z. and Xu, B. (2023) Complications of Unilateral Biportal Endoscopic Spinal Surgery for Lumbar Spinal Stenosis: A Systematic Review of the Literature and Meta-Analysis of Single-Arm Studies. *Orthopaedic Surgery*, **15**, 3-15. <https://doi.org/10.1111/os.13437>
- [22] Tsutsumimoto, T., Yui, M., Uehara, M., Ohta, H., Kosaku, H. and Misawa, H. (2014) A Prospective Study of the Incidence and Outcomes of Incidental Dural Tears in Microendoscopic Lumbar Decompressive Surgery. *The Bone & Joint Journal*, **96**, 641-645. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.96b5.32957>
- [23] Minamide, A., Yoshida, M., Yamada, H., Nakagawa, Y., Kawai, M., Maio, K., et al. (2013) Endoscope-Assisted Spinal Decompression Surgery for Lumbar Spinal Stenosis. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **19**, 664-671. <https://doi.org/10.3171/2013.8.spine13125>
- [24] Lee, H.G., Kang, M.S., Kim, S.Y., Cho, K.C., Na, Y.C., Cho, J.M., et al. (2020) Dural Injury in Unilateral Biportal Endoscopic Spinal Surgery. *Global Spine Journal*, **11**, 845-851. <https://doi.org/10.1177/2192568220941446>
- [25] Soma, K., Kato, S., Oka, H., Matsudaira, K., Fukushima, M., Oshina, M., et al. (2019) Influence of Incidental Dural Tears and Their Primary Microendoscopic Repairs on Surgical Outcomes in Patients Undergoing Microendoscopic Lumbar Surgery. *The Spine Journal*, **19**, 1559-1565. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2019.04.015>
- [26] Zhou, C., Zhang, G., Panchal, R.R., et al. (2018) Unique Complications of Percutaneous Endoscopic Lumbar Discectomy and Percutaneous Endoscopic Interlaminar Discectomy. *Pain Physician*, **21**, E105-E112.

- [27] Hsu, Y.C., Liu, Y.F., Chang, C.J., *et al.* (2024) How to Prevent Nerve Root Injury in Uniportal Full Endoscopic Lumbar Fusion Surgery? Insights from a Cadaveric Anatomic Study with Simulation Surgery. *Spine*, **49**, 1301-1310. <https://doi.org/10.1097/brs.0000000000005066>
- [28] Kim, H.S., Wu, P.H. and Jang, I.T. (2020) Lumbar Endoscopic Unilateral Laminotomy for Bilateral Decompression Outside-In Approach: A Proctorship Guideline with 12 Steps of Effectiveness and Safety. *Neurospine*, **17**, S99-S109. <https://doi.org/10.14245/ns.2040078.039>
- [29] Bai, T.Y., Meng, H., Lin, J.S., *et al.* (2025) Application of Intraoperative Neurophysiological Monitoring in Unilateral Biportal Endoscopic Lumbar Spine Surgery. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **20**, Article No. 334. <https://doi.org/10.1186/s13018-025-05738-8>
- [30] Kim, J.E., Choi, D.J. and Park, E.J. (2019) Evaluation of Postoperative Spinal Epidural Hematoma after Biportal Endoscopic Spine Surgery for Single-Level Lumbar Spinal Stenosis: Clinical and Magnetic Resonance Imaging Study. *World Neurosurgery*, **126**, e786-e792. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2019.02.150>
- [31] Ahn, J.S., Lee, H.J., Park, E.J., *et al.* (2019) Multifidus Muscle Changes after Biportal Endoscopic Spinal Surgery: Magnetic Resonance Imaging Evaluation. *World Neurosurgery*, **130**, e525-e534. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2019.06.148>
- [32] Merter, A. and Shibayama, M. (2019) Does the Drain Placement Technique Affect the Amount of Postoperative Spinal Epidural Hematoma after Microendoscopic Decompressive Laminotomy for Lumbar Spinal Stenosis? *Journal of Orthopaedic Surgery*, **27**, Article 2309499019869023. <https://doi.org/10.1177/2309499019869023>
- [33] Ikuta, K., Tono, O., Tanaka, T., Arima, J., Nakano, S., Sasaki, K., *et al.* (2006) Evaluation of Postoperative Spinal Epidural Hematoma after Microendoscopic Posterior Decompression for Lumbar Spinal Stenosis: A Clinical and Magnetic Resonance Imaging Study. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **5**, 404-409. <https://doi.org/10.3171/spi.2006.5.5.404>
- [34] Boadi, B.I., Ikwuegbuanyi, C.A., Inzerillo, S., Dykhous, G., Bratescu, R., Omer, M., *et al.* (2024) Complications in Minimally Invasive Spine Surgery in the Last 10 Years: A Narrative Review. *Neurospine*, **21**, 770-803. <https://doi.org/10.14245/ns.2448652.326>
- [35] Fourney, D.R., Dettori, J.R., Norvell, D.C. and Dekutoski, M.B. (2010) Does Minimal Access Tubular Assisted Spine Surgery Increase or Decrease Complications in Spinal Decompression or Fusion? *Spine*, **35**, S57-S65. <https://doi.org/10.1097/brs.0b013e3181d82bb8>
- [36] Yoshimoto, M., Iesato, N., Terashima, Y., Tanimoto, K., Oshigiri, T., Emori, M., *et al.* (2019) Mid-Term Clinical Results of Microendoscopic Decompression for Lumbar Foraminal Stenosis. *Spine Surgery and Related Research*, **3**, 229-235. <https://doi.org/10.22603/ssrr.2018-0076>
- [37] Rebelo, P., Sousa, C.P. and Campos, M.T. (2024) The Value of Intraoperative Neurophysiological Monitoring during Patient Positioning in Spine Surgery: A Preventive Strategy. *Cureus*, **16**, e73662. <https://doi.org/10.7759/cureus.73662>
- [38] Rahman, M., Summers, L., Richter, B., Mimran, R. and Jacob, R. (2008) Comparison of Techniques for Decompressive Lumbar Laminectomy: The Minimally Invasive versus the "Classic" Open Approach. *Minimally Invasive Neurosurgery*, **51**, 100-105. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1022542>
- [39] Murata, S., Minamide, A., Iwasaki, H., Nakagawa, Y., Hashizume, H., Yukawa, Y., *et al.* (2020) Microendoscopic Decompression for Lumbosacral Foraminal Stenosis: A Novel Surgical Strategy Based on Anatomical Considerations Using 3D Image Fusion with MRI/CT. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **33**, 789-795. <https://doi.org/10.3171/2020.5.spine20352>