



doi:10.7659/j.issn.1005-6947.250453

<http://dx.doi.org/10.7659/j.issn.1005-6947.250453>

China Journal of General Surgery, 2025, 34(8):1633-1639.

· 述评 ·

磁外科技术在肝胆胰外科创新应用与前景展望

吕毅, 马凯, 刘龙

(西安交通大学第一附属医院 肝胆外科/精准外科与再生医学国家地方联合工程研究中心/陕西省再生医学与外科工程研究中心, 陕西 西安 710061)



吕毅

摘要

“磁”具有“力”和“场”的特性, 可实现“非接触”作用。肝胆胰外科是手术技术不断创新的学科。2015年, 笔者团队率先提出“磁外科”概念, 并通过举办国际磁外科大会、创办期刊及编撰教材等工作, 推动其从技术探索发展为学科体系。许多创新始于肝胆胰外科实践: 磁力胆肠、胰肠吻合及胆管狭窄再通技术显著改善传统手术方式; 肝脏大血管磁力吻合实现了供肝快速植入, 促进了腹腔镜肝脏移植的开展; 磁场锚定技术实现了多维度牵引暴露, 减少Trocar孔及损伤, 优化了腹腔镜操作。未来, 磁外科将在多学科交叉推动下持续发展, 融合磁场导航与微纳手术机器人, 实现体内器械的精准追踪与引导, 突破影像引导的局限, 在肿瘤消融、管道穿刺等方面展现广阔前景。这将推动磁外科向精准化、微创化、智能化迈进, 为肝胆外科乃至更广领域带来革新方案。

关键词

磁外科; 肝胆胰外科; 磁压吻合; 磁锚定

中图分类号: R656

Magnetic surgery in hepatopancreatobiliary surgery: innovative applications and future perspectives

LU Yi, MA Kai, LIU Long

(Department of Hepatobiliary Surgery, the First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, National and Local Joint Engineering Research Center for Precision Surgery and Regenerative Medicine, Shaanxi Engineering Research Center for Regenerative Medicine and Surgery, Xi'an 710061, China)

Abstract

Magnetism possesses both "force" and "field" properties, enabling non-contact interactions. Hepatopancreatobiliary (HPB) surgery is a field characterized by continuous innovation. In 2015, our team first proposed the concept of "magnetic surgery," and subsequently advanced it from technical exploration to a disciplinary framework through organizing international conferences, founding a dedicated journal, and compiling textbooks. Many innovations originated in HPB practice: magnetic biliary and pancreatic anastomosis and magnetic recanalization for biliary strictures have significantly

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (92048202)。

收稿日期: 2025-08-18; 修订日期: 2025-08-24。

作者简介: 吕毅, 西安交通大学第一附属医院主任医师, 主要从事医工结合外科技术创新及医疗设备研发、新型生物材料应用、终末期肝病肝脏移植和肝胆胰肿瘤以手术为主的综合治疗、现代医学教育方面的研究。

通信作者: 吕毅, Email: luyi169@126.com

improved traditional approaches; magnetic vascular anastomosis has enabled rapid implantation of donor livers, supporting laparoscopic liver transplantation; and magnetic anchoring has provided multidimensional traction and exposure while reducing Trocar use and associated damage, thereby optimizing laparoscopic procedures. Looking ahead, multidisciplinary integration will drive the continued evolution of magnetic surgery, such as combining magnetic navigation with micro-nano surgical robots to achieve real-time tracking and guidance inside the body. These advances may overcome the limitations of conventional image guidance in applications like tumor ablation and catheter puncture. Ultimately, magnetic surgery is expected to evolve toward greater precision, minimal invasiveness, and intelligence, offering transformative solutions for HPB surgery and beyond.

Key words

Magnetic Surgery; Hepatopancreatobiliary Surgery; Magnetic Compression anastomosis; Magnetic anchoring

CLC number: R656

我国肝胆外科泰斗黄志强院士晚年反复强调：科学技术的发展带来了由生物学、信息学和物理学互相融合的生物智能时代，外科学自然亦会随之而改变。磁外科学这一新兴技术的崛起，为肝胆外科领域的创新发展注入了全新活力与机遇。作为一门融合了临床医学、磁材料学、生物学和物理学的前沿交叉学科，磁外科学凭借其独有的“非接触性磁场力调控”特性，能够精准地实现管道吻合、狭窄再通、器官锚定和管腔导航、间隙扩张、定向驱动以及可控示踪等关键操作。这不仅克服了传统手术器械在复杂解剖结构中的操作局限性和机械损伤性，更为肝胆外科的精准化、微创化治疗带来了突破性进展。现将我们探索创新的经验总结如下。

1 磁外科学体系的构建

其实，关于磁外科相关技术的探索已开展有40多年了，尤其是近20年来，多种磁外科技术在临床试用中的报道日益增多。磁外科学发展最初聚焦于解决无法采用常规手段治疗的疾病，通过与相关学科深度融合，解决了临床难题。但是全世界范围内，对于把磁这个物理要素引入临床，解决一系列临床问题，缺乏系统思维和认知。

20多年前，肝脏移植在国内刚刚起步，术中血管吻合难度最大。临床实践中，笔者一直尝试探索简单的、机械化的方式，实现血管快速、可靠吻合。偶然从战斗机的空中加油方式中汲取灵感，着力研发磁力大血管吻合装置，由此带领团队开展磁力、磁场、磁材料的临床应用新场景探

索。作为新兴的医工交叉结合领域，探索之路千头万绪，基础研究空白，国际上甚至缺乏统一概念。笔者团队以新型钕铁硼磁材料为研究切入点，针对医用场景开展系统研究并实现理论突破：一方面揭示了磁外科相关磁力效应与磁场作用的核心理论，另一方面攻克了普通磁体向医用磁体转化的关键共性技术。在此基础上，笔者团队于2010年在国际上率先提出“magnetic surgery（磁外科）”概念，将磁外科作为一门学科体系来发展，并建立了磁外科应用技术分类，包括磁力吻合、磁力再通、磁场调控、磁场锚定与磁体示踪等五大类技术^[1]。在这一背景下，由笔者团队发起并筹备的“首届国际磁外科大会”于2018年在西安举行，邀请了美国、韩国、捷克等多国专家共商发展远景，并成功签署“国际磁外科发展-西安共识”，至今已连续举办7届。2024年“第七届国际磁外科大会”进一步聚焦技术规范推广与临床培训基地建设，为磁外科技术的标准化应用与全球普及注入新动能。此外，2019年，笔者团队发起召开第665次香山科学会议“磁外科学，机遇和挑战”，会议成果由《科学通报》专辑刊出；创办 *Magnetic Medicine* 期刊入选中国科技期刊卓越行动计划。笔者团队领衔建立把《磁外科学》作为“医工学”专业学生的选修课；并建立陕西省磁医学重点实验室，培养了一批致力于磁外科发展的医工结合专业人才。基于上述一系列工作，笔者团队构建了磁外科学体系，现在得到国内外越来越多专家和外科医师的认可。美国微创外科主席 Gagner 教授高度赞扬团队在磁力血管吻合以及磁外科学体系构建方面的卓越工作。美国 ACS 前主席

Harrison 教授则充分肯定了笔者团队提出的磁外科学相关理论和技术分类。

2 磁外科学在国内外肝胆胰外科的应用

2.1 磁力腹部大血管、消化道吻合技术

磁力吻合技术是磁外科学在肝胆外科领域中最成熟的技术之一，其核心原理是利用磁性材料在磁场下对于需要吻合的组织产生持续且可控的磁力，实现组织吻合。其典型应用场景是腹部大血管吻合以及胆肠、胰肠等消化道吻合^[2-6]（图 1）。

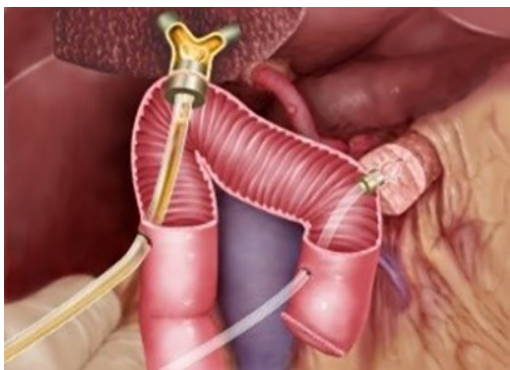


图 1 磁力吻合技术示意图

Figure 1 Schematic diagram of magnetic compression anastomosis technique

磁力血管吻合技术的探索最早见于日本学者 Obora 等^[7]报道。其后德国 Leipzig 大学的研究小组^[8-9]在 Ventrica 公司支持下成功研发出一种可用于冠状动脉吻合的磁性血管吻合器（The Magnetic Vascular Positioner System, MVP®），为该领域首个上市产品。笔者团队^[10]率先将磁力血管吻合技术

引入腹部大血管领域，首创可拆解式“C”型大血管磁力吻合装置，将磁环加载于血管断端，吻合时利用磁力对吸实现血管断端“瞬时”接通，在血流开放状态下完成血管壁缝合，最后撤除磁环。该装置可应用于腔静脉、门静脉的快速吻合，基于此，将肝移植无肝期由手工缝合 40~50 min 缩至 9 min 50 s，创世界纪录。进一步将其与腹腔镜技术相结合，实现腹腔镜下全肝移植（图 2）。

胆、胰恶性肿瘤细胞大多分化程度低、呈浸润生长，扩大根治及术后综合治疗可明显提高 5 年生存率。胆肠吻合和胰肠吻合是胆、胰恶性肿瘤切除后消化道重建的主要方法，但缝合难度大、吻合口漏和狭窄发生率高，且腹腔镜条件下缺乏操作便捷的吻合装置^[11-12]。Jamidar 等^[13]设计了一种胆总管十二指肠磁力吻合装置，由一个钕铁硼圆柱形磁体和一个可变形的金属-塑料铰接装置组成，可以根据胆道形态的变化而产生自适应折叠变化，有利于吻合口完成后磁吻合装置的排除。笔者团队于国际首创磁力胆肠、胰肠吻合技术，应用于胆肠吻合术、胰十二指肠切除术等术式，治疗胆道肿瘤、胆道损伤、胰腺肿瘤等。其磁性吻合器为成对的带有沉孔结构的圆柱状适形磁体，孔内固定硅胶支架管。病变切除后胆管、胰管残端连续荷包缝合，置入子磁体、收紧荷包，支架管穿肠壁自空肠断端引出，沿支架管分别推送母磁体，子母磁体吸合，吻合完成。术后 2~3 周经腹壁剪断支架管，磁体经消化道自行排出体外。应用病例无胆汁漏或胰瘘发生，远期吻合口狭窄发生率仅为 1.5%^[14-15]。在此基础上，研发了腹腔镜磁力胆肠吻合器，填补国际空白。

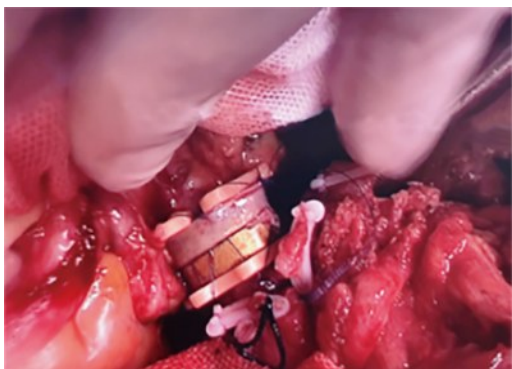
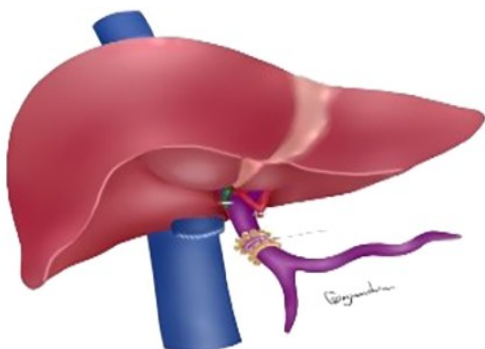


图 2 磁辅助门静脉吻合术

Figure 2 Magnetic-assisted portal vein anastomosis

2.2 消化道狭窄/闭锁磁力再通技术 (magnetic recanalization technique)

磁力再通技术是利用两个磁体之间的磁性吸引力，实现梗阻部位中心区域组织压榨坏死，周围组织逐渐愈合，随后磁体脱落经管道排出，最终实现管腔的再通^[16]（图3）。

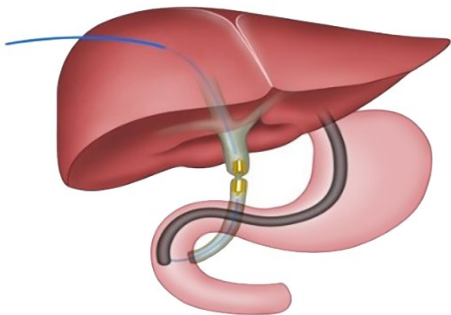


图3 磁力再通技术示意图

Figure 3 Schematic diagram of magnetic recanalization technique

继发于肝移植手术、胆道手术、胆道炎症等的胆道狭窄是临床上难以处理的棘手问题，也是磁力再通技术的早期应用场景。Mimuro 等^[17]运用磁力再通技术治疗手术创伤后的严重胆道狭窄；Muraoka 等^[18]将磁力再通技术运用到活体肝脏移植后胆肠吻合口狭窄的治疗中。笔者团队在国内率先开展胆道狭窄的磁力再通技术探索，并将其拓展应用至先天性食管闭锁、狭窄、直肠、肛门闭锁等复杂疾病治疗中^[19-22]。笔者团队基于腔道特点、组织特征和狭窄/闭锁段距离，设计了一系列满足内镜下植入的磁力再通装置。通常经造瘘/内镜通道于狭窄端一侧置入磁体，再经内镜途径置

入另一侧磁体，两侧磁体压迫形成通畅吻合口，一旦狭窄两端磁体放置到位，相互吸引可使手术成功率近乎 100%^[23-24]。首创的系列管道狭窄/闭锁再通新术式，被美国、韩国等国同行所应用，纳入内镜治疗良性胆道狭窄亚太指南。该技术成功应用于严重复合创伤后胆道闭锁的患者，该患者先后经历 6 次手术，无法再次进行开腹手术，基于磁力再通技术通过内镜方式实现胆道再通。

2.3 腹腔镜磁场锚定技术 (magnetic anchor technique)

磁场锚定技术原理是磁体之间通过“场”的形式相互作用，两个磁体相距一定距离即可产生力的作用；当两个磁体分别位于密闭空间内外时，密闭空间外的磁体能够拖动密闭空间内的磁体进行位置改变，使其活动能充分利用密闭空间且不受入口限制。

磁场锚定技术应用于腹腔镜场景时，可以使相应的牵引暴露装置不占用 Trocar 空间。如此，在减少 Trocar 数目的情况下，获得良好的术野暴露效果，同时不增加操作难度。腹腔镜磁场锚定技术探索最早见于 Cadeddu 等^[25]研究，而 Rivas 团队^[26]研制的磁场锚定牵拉装置实现了临床应用，实现减 Trocar 胆囊切除术，成为首个美国食品和药物管理局批准上市的磁场锚定装置。笔者团队基于前期建立的医用磁路设计模型，结合磁场锚定技术体外磁体应用场景，研发磁场锚定智能牵引装置，并于 2023 年底获得国家Ⅱ类医疗器械注册证，目前在肝胆外科领域应用于减 Trocar/单孔环境下的胆囊切除术、肝切除术、胰十二指肠切除术等^[27-30]。同时，在减重手术、盆腔手术、胸腔手术等领域展现良好的应用前景^[31-32]（图4）。

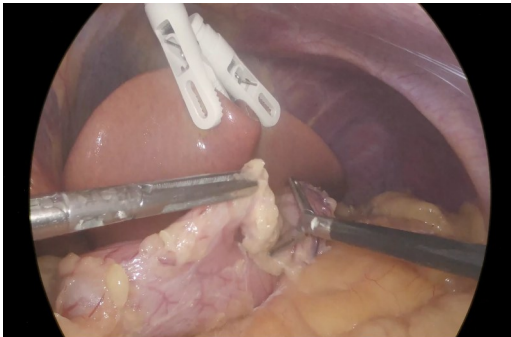
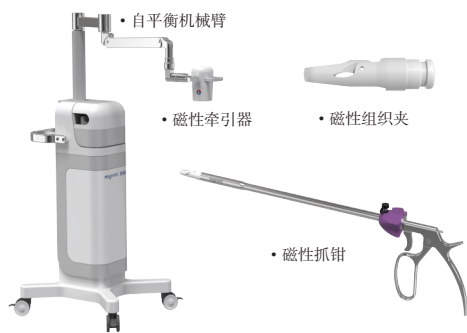


图4 磁场锚定装置及其在腹腔镜袖状胃切除术中应用

Figure 4 Magnetic anchoring device and its application in laparoscopic sleeve gastrectomy

3 磁外科技术未来

磁外科技术的创新突破将深度依赖于多学科交叉融合。机械工程与微创外科跨界创新,拓展磁外科在微创场景的应用,实现更灵活的操作。医学影像学与人工智能(artificial intelligence, AI)协同将重构磁外科精准治疗体系,通过“影像-磁场-器械运动”闭环调控体系,大幅提升手术精度。材料科学与生物医学工程的融合将持续突破磁性器械的性能边界,开发出兼具磁控功能与生物治疗作用的复合型植入器械。

3.1 与手术机器人结合

手术机器人的出现极大地推动了外科微创化的发展进程,其中腔镜手术机器人在手术机器人领域市场前景最为广阔,微创性是其核心竞争力(生命线)。进一步发展方向是将腹腔镜手术由“多孔”进化为“单孔”。传统思路是将手术机器人设计由“一体一臂”式改进为“一体多臂”式,然而传统定位方式造成所有器械拥挤于单一戳卡内,使得切口直径增大且置入器械的数量受限,同时灵活性与应力难以统一。因此,根本的解决方法在于跳出固有设计理念,创新腔镜手术机器人的器械定位方式。磁场锚定技术有望有效解决此问题。笔者团队在前期国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目工作的基础上,正在进行磁锚定导航微手术机器人舰队的研制工作,推动手术机器人技术的微创化发展。

3.2 与AI结合

AI正深刻推动着磁外科技术的革新。AI与磁控平台的深度融合,特别是在多功能磁性手术机器人的研发中,有望催生复合型智能磁外科系统,加速磁外科向智能化迈进。通过临床医生参与构建磁外科专项数据集,并利用该数据集训练机器学习算法,可提升MRI等影像模态在磁外科术前评估、术中导航中的精准度,实现图像的自动化解析,进而为磁外科手术方案的制定与精准实施提供技术支持。此外,磁性微型手术器械/机器人与计算框架(包括术中图像处理、深度学习、伺服反馈调控及强化学习)的结合,能显著提升其在体内复杂腔道(如胃肠道、胆道)中的智能导航能力—包括自主避障、精准轨迹规划等,为微创磁外科手术的精准操作奠定基础。笔者团队正在进行微创腔镜外科导航体系的研制工作,未来

有望与磁外科技术有机结合,提高手术方案的精准性。

3.3 与微纳材料结合

微纳材料是尺寸在微米或纳米级别的材料,具有独特的尺寸效应、表面效应与量子效应,是当前材料科学研究的热点领域。其在医疗器械领域应用的优势已初见端倪,目前基于微纳金属材料制备的血管支架,可以获得更厚的载药涂层,以及更可靠的支撑强度,提高支架使用的安全性。在新兴的磁外科学领域,微纳材料同样前景广阔。研究人员已开发出了适用于磁外科微型器械的新型复合材料,这些材料不仅具备良好的磁响应特性,还拥有优异的生物相容性和机械强度,使得磁控器械在体内更为灵活高效地运作。此外,通过结合纳米技术与声学驱动原理,研究者还设计出了一种能够在超声波场中产生特定振动模式的微米级结构,这种结构能够增强磁外科器械在狭窄、曲折人体管道内的推进力和机动性,为微创手术提供了新的工具和技术手段^[33-34]。

4 挑战与展望

磁外科学以其独特的优势在肝胆外科领域展现出巨大的创新潜力和临床应用价值,从管腔吻合到肿瘤治疗,从手术辅助到精准诊疗的多维度创新,为复杂肝胆疾病的治疗提供了更精准、安全、微创的解决方案。然而磁外科学的进一步发展还面临基础研究方面的挑战。例如:需进一步强化磁场生物学效应研究,以明晰磁场对肝胆胰周围敏感组织的影响,从而阐明磁场实现吻合、管道再通等机制;深入磁生物力学研究,实现复杂解剖场景下的磁力精准控制,如肝门部、胰头区等手术时,精细作用组织避免副损伤;开展磁性材料体内留置的长期随访研究,进一步证实其生物相容性。磁医学研究者应该以多学科交叉合作为导向,持续推动技术创新与临床转化,为肝胆外科领域带来更多的变革,造福广大患者。笔者团队未来将继续深耕磁医学领域,聚焦临床需求与技术突破的深度融合,加速推动更多的创新成果从实验室走向临床应用。通过产学研用让磁外科技术惠及广大患者,为提升全民健康素养,助力健康中国建设贡献更大力量。

作者贡献声明：吕毅作为通信和第一作者，全程把控写作的学术方向、内容架构与核心观点凝练。确立“磁外科学体系构建-肝胆胰外科临床的应用-多学科交叉未来展望”的三层写作逻辑，主导“挑战与展望”章节创作，负责全文质量审核。马凯主要参与述评中的“磁外科技术临床应用”部分的内容梳理与数据支撑，协助完成“磁外科在国内外肝胆胰外科的应用”章节的文字撰写，补充临床应用实例与技术实施细节，增强内容的实践指导性。刘龙侧重参与述评中“磁外科技术未来”章节的文献调研与内容撰写，分析磁导航与微纳机器人的融合、AI辅助磁外科精准治疗的发展方向，为述评提供技术前沿视角。

利益冲突：所有作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

- [1] 严小鹏, 商澎, 史爱华, 等. 磁外科学体系的探索与建立[J]. 科学通报, 2019, 64(8):815-826. doi:10.1360/N972018-00638.
Yan XP, Shang P, Shi AH, et al. Exploration and establishment of magnetic surgery[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(8): 815-826. doi:10.1360/N972018-00638.
- [2] Jang SI, Lee KH, Yoon HJ, et al. Treatment of completely obstructed benign biliary strictures with magnetic compression anastomosis: follow-up results after recanalization[J]. Gastrointest Endosc, 2017, 85(5):1057-1066. doi:10.1016/j.gie.2016.08.047.
- [3] Kubo M, Wada H, Eguchi H, et al. Magnetic compression anastomosis for the complete dehiscence of hepaticojejunostomy in a patient after living-donor liver transplantation[J]. Surg Case Rep, 2018, 4(1):95. doi:10.1186/s40792-018-0504-6.
- [4] Zhang MM, Tao J, Sha HC, et al. Magnetic compression anastomosis to restore biliary tract continuity after obstruction following major abdominal trauma: a case report[J]. World J Gastrointest Surg, 2024, 16(6):1933-1938. doi: 10.4240/wjgs.v16.i6.1933.
- [5] Jang SI, Do MY, Lee SY, et al. Magnetic compression anastomosis for the treatment of complete biliary obstruction after cholecystectomy[J]. Gastrointest Endosc, 2024, 100(6):1053-1060. doi:10.1016/j.gie.2024.05.009.
- [6] Garg P, Sharma M. Magnetic compression anastomosis for treatment of post-cholecystectomy bile duct injury related biliary strictures[J]. J Clin Interv Radiol ISVIR, 2025, 9(1):40-46. doi: 10.1055/s-0044-1795157.
- [7] Obora Y, Tamaki N, Matsumoto S. Nonsuture microvascular anastomosis using magnet rings: preliminary report[J]. Surg Neurol, 1978, 9(2):117-120.
- [8] Klima U, Falk V, Marinka M, et al. Magnetic vascular coupling for distal anastomosis in coronary artery bypass grafting: a multicenter trial[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2003, 126(5):1568-1574. doi:10.1016/s0022-5223(03)01314-x.
- [9] Filsoufi F, Farivar RS, Aklog L, et al. Automated distal coronary bypass with a novel magnetic coupler (MVP system)[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2004, 127(1): 185-192. doi: 10.1016/j.jtcvs.2003.04.005.
- [10] Zhang XG, Liu XM, Wang SP, et al. Fast vascular reconstruction with magnetic devices in liver transplant: a novel surgical technique[J]. Liver Transpl, 2021, 27(2): 286-290. doi: 10.1002/lt.25889.
- [11] 洪夏飞, 李永政, 吴文铭. 胰腺术后腹腔感染的再思考[J]. 中华普通外科杂志, 2025, 40(3):174-177. doi:10.3760/cma.j.cn113855-20240820-00549.
Hong XF, Li YZ, Wu WM. Updated understandings of postoperative intra-abdominal infection in pancreatic surgery[J]. Chinese Journal of General Surgery, 2025, 40(3): 174-177. doi: 10.3760/cma.j.cn113855-20240820-00549.
- [12] Rennie O, Sharma M, Helwa N. Hepatobiliary anastomotic leakage: a narrative review of definitions, grading systems, and consequences of leaks[J]. Transl Gastroenterol Hepatol, 2024, 9:70. doi:10.21037/tgh-24-9.
- [13] Jamidar P, Cadeddu M, Mosse A, et al. A hinged metalloplastic anastomotic device: a novel method for choledochoduodenostomy[J]. Gastrointest Endosc, 2009, 69(7): 1333-1338. doi:10.1016/j.gie.2008.09.061.
- [14] Liu XM, Li Y, Zhang HK, et al. Laparoscopic magnetic compression biliojejunostomy: a preliminary clinical study[J]. J Surg Res, 2019, 236:60-67. doi:10.1016/j.jss.2018.11.010.
- [15] Li Y, Liu XM, Zhang HK, et al. Cholangiojejunostomy using a novel magnamosis device: initial clinical results[J]. World J Surg, 2021, 45(10):3138-3145. doi:10.1007/s00268-021-06196-z.
- [16] Li Y, Zhang N, Lv Y, et al. Expert consensus on magnetic recanalization technique for biliary anastomotic strictures after liver transplantation[J]. Hepatobiliary Surg Nutr, 2021, 10(3): 401-404. doi:10.21037/hbsn-20-800.
- [17] Mimuro A, Tsuchida A, Yamanouchi E, et al. A novel technique of magnetic compression anastomosis for severe biliary stenosis[J]. Gastrointest Endosc, 2003, 58(2): 283-287. doi: 10.1067/mge.2003.354.
- [18] Muraoka N, Uematsu H, Yamanouchi E, et al. Yamanouchi magnetic compression anastomosis for bilioenteric anastomotic stricture after living-donor liver transplantation[J]. J Vasc Interv Radiol, 2005, 16(9):1263-1267. doi:10.1097/01.RVI.0000173280.56442.9E.

- [19] Li Y, Sun H, Yan X, et al. Magnetic compression anastomosis for the treatment of benign biliary strictures: a clinical study from China[J]. Surg Endosc, 2020, 34(6): 2541–2550. doi: 10.1007/s00464-019-07063-8.
- [20] Liu SQ, Li QF, Lv Y, et al. Magnetic compression anastomosis for rectal atresia following necrotizing enterocolitis: a case report[J]. Medicine (Baltimore), 2020, 99(50): e23613. doi: 10.1097/MD.00000000000023613.
- [21] Liu SQ, Lv Y, Fang Y, et al. Magnetic compression for anastomosis in treating an infant born with long-gap oesophageal atresia: a case report[J]. Medicine (Baltimore), 2020, 99(42): e22472. doi:10.1097/MD.00000000000022472.
- [22] Zhang HK, Li XQ, Song HX, et al. Primary repair of esophageal atresia gross type C via thoroscopic magnetic compression anastomosis: a case report[J]. World J Gastrointest Surg, 2023, 15(12):2919–2925. doi:10.4240/wjgs.v15.i12.2919.
- [23] Zhang MM, Zhao GB, Zhang HZ, et al. Novel deformable self-assembled magnetic anastomosis ring for endoscopic treatment of colonic stenosis via natural orifice[J]. World J Gastroenterol, 2023, 29(33):5005–5013. doi:10.3748/wjg.v29.i33.5005.
- [24] Zhang MM, Sha HC, Lu GF, et al. Treatment of refractory esophageal stenosis after endoscopic submucosal dissection with magnetic compression anastomosis[J]. Endoscopy, 2024, 56(S 01): E280–E282. doi:10.1055/a-2279-6910.
- [25] Cadeddu J, Fernandez R, Desai M, et al. Novel magnetically guided intra-abdominal camera to facilitate laparoendoscopic single-site surgery: initial human experience[J]. Surg Endosc, 2009, 23(8): 1894–1899. doi:10.1007/s00464-009-0459-6.
- [26] Rivas H, Robles I, Riquelme F, et al. Magnetic surgery: results from first prospective clinical trial in 50 patients[J]. Ann Surg, 2018, 267(1):88–93. doi:10.1097/SLA.0000000000002045.
- [27] Bai J, Zhang M, Shi A, et al. Magnetic anchor technique in laparoscopic cholecystectomy: a single-center, prospective, randomized controlled trial[J]. Surg Endosc, 2023, 37(2): 1005–1012. doi:10.1007/s00464-022-09562-7.
- [28] Zhang M, Ma J, Gai J, et al. Magnetic anchor technique assisted laparoscopic cholecystectomy in swine[J]. Sci Rep, 2023, 13(1): 4864. doi:10.1038/s41598-023-32157-8.
- [29] Tian B, Zhang M, Ren Y, et al. Clinical application of magnetic anchor technique in laparoscopic cholecystectomy: the first retrospective study in China[J]. Front Surg, 2024, 10:1335805. doi: 10.3389/fsurg.2023.1335805.
- [30] Zhang M, Bai J, Zhang D, et al. Clinical feasibility of laparoscopic left lateral segment liver resection with magnetic anchor technique: The first clinical study from China[J]. World J Gastrointest Surg, 2024, 16(5):1336–1343. doi:10.4240/wjgs.v16.i5.1336.
- [31] Li Y, Zhang M, Shi A, et al. Magnetic anchor technique-assisted thoracoscopic lobectomy in beagles[J]. Sci Rep, 2022, 12(1):11916. doi:10.1038/s41598-022-16050-4.
- [32] Zhang L, Wang L, Zhao L, et al. Internal grasper and magnetic anchoring guidance system in gynecologic laparoendoscopic single-site surgery: a case series[J]. J Minim Invasive Gynecol, 2021, 28(5):1066–1071. doi:10.1016/j.jmig.2020.09.022.
- [33] Ahmed D, Sukhov A, Hauri D, et al. Bio-inspired acousto-magnetic microswarm robots with upstream motility[J]. Nat Mach Intell, 2021, 3(2):116–124. doi:10.1038/s42256-020-00275-x.
- [34] Zhang Z, Sukhov A, Harting J, et al. Rolling microswarms along acoustic virtual walls[J]. Nat Commun, 2022, 13(1): 7347. doi: 10.1038/s41467-022-35078-8.

(本文编辑 熊杨)

本文引用格式:吕毅,马凯,刘龙.磁外科技在肝胆胰外科创新应用与前景展望[J].中国普通外科杂志,2025,34(8):1633–1639. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.250453

Cite this article as: Lu Y, Ma K, Liu L. Magnetic surgery in hepatopancreatobiliary surgery: innovative applications and future perspectives[J]. Chin J Gen Surg, 2025, 34(8): 1633–1639. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.250453