

第620次学术讨论会·强磁场与生命健康: 新条件、新问题、新机遇



磁外科学体系的探索与建立

严小鹏^{1,2,3}, 商澎⁴, 史爱华^{2,3}, 刘雯雁^{1,2,3}, 刘亚雄⁵, 吕毅^{1,2,3*}

1. 西安交通大学第一附属医院肝胆外科, 西安 710061;
2. 精准外科与再生医学国家地方联合工程研究中心, 西安 710061;
3. 陕西省再生医学与外科工程研究中心, 西安 710061;
4. 西北工业大学深圳研究院, 深圳 710072;
5. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049

* 联系人, E-mail: luyi169@126.com

2018-06-28 收稿, 2018-10-25 修回, 2018-10-25 接受, 2018-11-28 网络版发表

国家自然科学基金(81470896, 81700545, 30830099, 81127005, 51275387)、陕西省自然科学基金(2017JQ8021)和陕西省科技资源开放共享平台项目(S2016TFPT0024)资助

摘要 21世纪外科学领域利用磁性装置进行技术创新和革新的报道越来越多, 其中某些技术显示出极大的优越性和颠覆性, 有取代传统技术的趋势. 主要体现在两个方面: 一方面, 部分先进的磁外科新技术可极大地简化现有手术操作过程、降低操作难度、缩短操作时间、提高治疗效果; 另一方面借助先进的磁外科技术, 对一些临床疾病的治疗模式和观念产生了颠覆性的改变. 然而, 就目前世界各地的相关研究现状来看, 存在着很多关键共性瓶颈问题, 比如: 基础研究薄弱, 核心关键问题未能系统突破, 理工科先进技术交叉、渗透、融合不充分, 科学概念及临床应用规范未建立等. 我国医学界虽然涉足磁外科技术开发领域较晚, 但却在磁外科方面进行了相对系统化的研究, 产生了一系列国际首创技术, 尤其是在理论创新和学科化建设方面走在了世界前列, 承担起了世界磁外科领跑者的角色. 本文以创建国际磁外科体系为主线, 评述磁外科发展现状和基础; 对磁外科发展阶段进行科学划分; 明确提出了磁外科临床应用五大体系并建立相应的概念; 提出通过跨学科交叉整合的方法来创建磁外科学体系. 以求夯实磁外科基础研究、建立磁外科理论体系、规范磁外科临床研究、强化磁性材料、生物力学和临床诊疗技术深度交叉融合, 凝聚稀土金属材料专家、生物力学专家和临床医生的智慧, 全面建立磁外科学理论体系并开展临床应用研究, 从而促进磁外科快速科学发展, 造福人类健康.

关键词 磁外科, 钕铁硼, 磁压榨技术, 磁锚定技术, 磁导航技术

自1978年日本学者Obora等人^[1]报道了磁压榨血管吻合的实验研究以来, 伴随着高性能稀土钕铁硼的成功研制及工业化生产的开展, 利用磁体间特殊的“非接触性”磁场力进行器官吻合重建的研究为现代外科开创了一种崭新的无缝线化吻合技术. 目前磁压榨技术已被用于胃肠道吻合^[2-6]、食管闭锁(狭窄)再通^[7-11]、胆道闭锁(狭窄)再通^[12-21]、胆肠吻合^[22-27]、血管吻合^[28-44]、直肠阴道瘘修补^[45-48]等诸

多领域. 同时在磁压榨技术下拓展出了许多新的临床技术, 如磁导航内窥镜技术^[49]、磁锚定减戳卡腔镜技术^[50-54]、磁锚定先天畸形矫正^[55-58]、磁性材料示踪技术^[59-61]等. 纵观国内外磁外科的研究已成蓬勃之势, 成为临床创新极具生命力的领域之一, 但目前磁外科的研究现状及发展轨迹存在不少缺陷和不足, 诸如理论创新滞后、系统化研究缺失、基础研究不足、临床应用规范尚未统一、未来发展前景不明朗、特定

引用格式: 严小鹏, 商澎, 史爱华, 等. 磁外科学体系的探索与建立. 科学通报, 2019, 64: 815-826

Yan X P, Shang P, Shi A H, et al. Exploration and establishment of magnetic surgery (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 815-826, doi: 10.1360/N972018-00638

发展阶段学科范式未确立等。因此,我们认为,在现阶段加快磁外科理论创新研究、建立磁外科基础研究框架和临床应用体系、明确相关概念、以构建磁外科学体系为目标来带动磁外科快速健康发展具有极其重要的理论和实践意义。

1 磁外科发展的3个阶段

磁外科相关研究自1978年开始至今已有40年,其发展历程大致经历了3个阶段(表1):实验论证阶段、自由探索阶段和学科建设阶段。每个阶段都涌现出了具有代表性的杰出人物,与之相对应的是磁外科相关技术和概念的趋于成熟和完善。

1.1 实验论证阶段

第一阶段为实验论证阶段(1978~2000年)。日本学者Obora等人^[1]于1978年利用针环结构的钐钴磁体进行了大鼠和犬的血管吻合实验,结果显示血管通畅性良好,这是最早的磁性吻合的研究。之后外科医生关注到当儿童误吞磁体后可发生消化道内瘘,受此现象启发外科医生大胆尝试并开展了磁体用于消化道吻合的实验研究。例如,Jansen等人^[2]利用磁环来实现远端结肠吻合,并取得了良好的吻合效果。此后有关胃肠道吻合的研究成为了磁外科吻合研究的热点。在2000年以前,绝大部分研究主要集中于动物实验论证阶段,临床应用有限。在此阶段日本的研究处于相对领先地位,尤以山内荣五郎(Yamanouchi)团队成就巨大,并初步形成了以“磁压榨吻合(magnetic compression anastomosis, MCA)”为主流的提法,在日本国内被称为“山内法(Yamanouchi's method)”^[62]。

1.2 自由探索阶段

第二阶段为自由探索阶段(2001~2010年)。自20世纪80年代后期第三代稀土金属钕铁硼永磁材料被研发成功,凭借其优良的磁学性能及并不高昂的价

格而被广泛使用^[63]。同时在第一阶段大量实验结果论证的基础上,磁外科相关技术的优越效果使世界各地外科专家由迟疑、观望阶段转入自由探索阶段。世界范围内各磁外科研究机构犹如雨后春笋般涌现,各种创新技术的研发和应用也进入快车道,诞生了一系列先进的磁外科技术和磁外科产品。随着MCA的发展,2009年美国Harrison研究团队^[64]首次在论文中使用了magnamosis(磁吻合)的提法,至此我们可以认为磁吻合是继手工缝线缝合法、staple吻合法之后的一种新吻合方法。

尽管第二阶段是磁外科快速发展的时期,但是其发展过程中也存在一些缺陷,主要体现在:(1)各研究中心之间交流沟通不充分,特定阶段学科范式未形成,各个研究中心未能集中力量解决磁外科发展中的共性问题,部分研究存在着重复多次实验;而在某些领域却关注较少,例如磁性材料体内植入标准的缺失、磁体磁路结构优化设计、磁力压榨与组织的时间效应关系等属于研究的薄弱环节;(2)多学科交叉融合不充分。磁外科相关技术虽然最终落脚点是服务于临床诊疗,但该技术的实施却涉及磁性材料、有限元模拟分析、精密加工技术、表面改性处理等多个理工科技技术的支持,但实际上相关理工学科交叉支持力度不够,导致磁外科发展处于经验学为主导的阶段;(3)磁外科相关概念不清晰,框架体系未建立。针对磁外科技术中的专业用语尚未形成统一规范的概念,不利于交流和推广。磁外科基本框架体系缺失,对磁外科未来的发展缺乏长远指导意义;(4)磁外科研究瓶颈梳理不到位,未来发展前景缺乏清晰的目标导向。目前磁外科在国内外尚无指导临床应用的统一规范及标准,缺乏对临床开展磁外科具有指导意义的指南或专家共识。

这种现状如不及时改变将对磁外科的临床推广产生诸多不良影响:第一,迟滞医生的临床实践行为。临床指导性意见的缺失会使大部分持有观望、迟

表1 磁外科发展的3个阶段

Table 1 Three phases of magnetic surgery development

时间	发展阶段	主要人物	概念的升迁
1978~2000年	实验论证	Yamanouchi E(日本)	磁压榨吻合(magnetic compression anastomosis)
2001~2010年	自由探索	Harrison M R(美国)	磁吻合(magnamosis)
2008年至今	学科建设	吕毅、严小鹏等(中国); Rivas H(美国)	磁外科(magnetic surgery)

疑态度的医生不敢尝试磁外科相关技术;第二,滥用磁外科技术。目前对磁外科进行深入系统研究的临床医生数量极其有限,在无清晰明确的临床适应症、禁忌证和操作规范的约束和指导下,部分具有“冒险”精神的医生会采用形而上学的技术模仿在临床开展磁外科相关技术,这将有可能对部分患者造成严重伤害,不利于磁外科的健康发展;第三,医疗器械厂商不能积极投入研发。先进磁外科技术的创新主要来源于临床医生,但是优良的磁外科医疗器械产品的研发和生产离不开医疗器械厂商的参与和其研发资金的投入,磁外科临床应用优势如不能引发医疗器械厂商的关注,将不利于磁外科的长远发展。

1.3 学科建设阶段

第三阶段为学科建设阶段(2008年至今)。就国内磁外科发展而言,中国磁外科起步于2003年左右,相对于日本、韩国、俄罗斯等国家稍晚,但中国磁外科发展迅猛,尤以我们团队在磁外科方面研究最深入、最全面。在一定程度上我们团队的磁外科研究水平代表了中国磁外科的研究水平。放眼世界,日本、韩国主要集中于磁压榨狭窄胆道疏通技术的临床研究和开展;德国在磁吻合冠状动脉搭桥方面成绩显著;美国在食管闭锁/狭窄的磁压榨治疗、胃食管反流病的磁环抗返流研究以及磁锚定技术方面开展较早;其他国家如法国、以色列、土耳其、阿根廷、英国、荷兰、意大利、捷克、爱尔兰等国也有相关研究的报道。但深入分析不难发现国外研究存在严重的“偏科”现象,缺乏系统性的研究。从这一点上来看,我国的磁外科走在了世界的前列,我们从磁性材料体内植入的安全性评价、磁路优化设计、磁力组织愈合的时间效应关系等基础研究,再到一系列的国际首创技术,在磁压榨、磁锚定、磁导航、磁悬浮、磁示踪等技术相关领域均有深入研究。

我们认为magnetic compression anastomosis和magnamosis不足以概括磁相关技术在临床的应用,因此于2010年提出了“magnetic surgery(磁外科)”的概念,并认为应将磁外科作为一门学科体系来发展。正是在这样的背景下,2018年4月12日,在北京举行的第620次香山科学会议上,吕毅教授作为唯一受邀的临床医生参会并做了“磁外科学体系构建——时代际遇下的国家战略”的报告,向与会的国内理工科磁学专家介绍了世界磁外科的发展现状,并在会议上提

出由中国率先在世界上建立磁外科学体系的想法,得到与会专家的高度关注。紧随其后,由吕毅教授发起并筹备的“首届国际磁外科大会”于2018年6月1~3日在西安举行。此次大会邀请了来自美国、韩国、捷克、爱尔兰、土耳其、菲律宾、阿根廷等国家的磁外科专家共商磁外科发展远景,并在吕毅教授的主持和倡导下,与会各国专家签署了“国际磁外科发展-西安共识”。这是国际磁外科发展的重要里程碑,同时也确立了中国磁外科在国际磁外科发展中的领导者角色。至此,磁外科开始迈入科学、规范、深入、全面的学科建设阶段。

2 磁外科临床应用体系和基本概念的建立

根据磁外科相关临床技术应用方式及原理的不同,磁外科临床技术可归纳为以下五大类(图1)。

为规范磁外科研究及临床应用,我们提出以下概念,在规范概念时,考虑到对既往研究的传承,因此保留了一些以前的合适概念,同时又补充和修订了新的概念。

2.1 磁压榨技术

磁压榨技术(magnetic compression technique, MCT)是利用2个或2个以上磁体(或数个磁体与数个顺磁性材料)之间的磁性吸引力,通过开腹(胸)手术、腔镜手术、内镜操作、介入操作等来实现脏器的连接再通、组织的压榨闭合、管腔内容物的限流等,从而实现临床疾病进行诊断和治疗的目的。在磁压榨技术中,位于压榨组织两边的磁体分别称为母磁体(parent magnet, PM)和子磁体(daughter magnet, DM)。

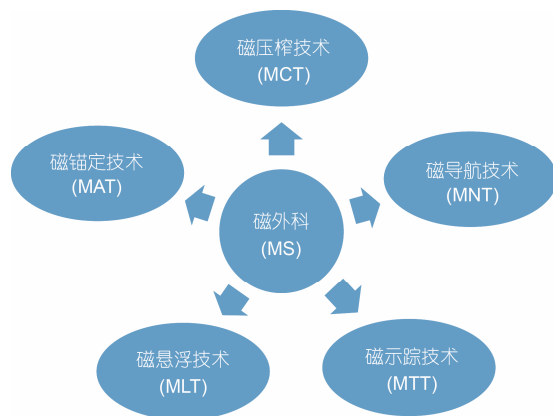


图1 磁外科临床应用体系

Figure 1 Magnetic surgery clinical application system

为规范磁外科学相关概念,我们将磁压榨过程中体积相对较大、位置相对固定或发挥牵拉作用的磁体称为母磁体;将磁压榨过程中体积相对较小、位置相对变化较大或被动牵拉的磁体称为子磁体,当然子、母磁体也是相对的概念^[65].文献[66,67]也将母磁体称为mother magnet(MM),但按照绝大多数研究者的习惯,我们建议统一使用parent magnet(PM)的名称.

磁压榨技术实现器官吻合是利用“非接触性”磁场力,使磁体之间的压榨组织发生缺血-坏死-脱落,而压榨旁组织发生粘连-修复-愈合的病理变化过程^[65],从而实现吻合的目的.其压榨病理变化过程如图2(a)所示.当然,根据压榨力大小以及要实现的压榨目的其病理变化是有差异的.在完成消化道吻合时其病理改变严格遵循上述过程,但在血管侧侧吻合或端端吻合时,对于血管腔内主要是内膜的修复和覆盖,血管腔外则是粘连-修复-愈合的过程,图2(b).此外,2013年, *the New England Journal of Medicine*报道了利用LINX[®]装置治疗胃食管反流病的临床研究,其结果令人鼓舞,虽然该技术并未涉及吻合过程,但我们认为其原理与MCT一致,仍可归属于MCT,这是对MCT更灵活运用的特殊范例^[65](图2(c)).

2.2 磁导航技术

磁导航技术(magnetic navigation technique, MNT)利用体外磁场牵引带动体内的响应磁体或顺磁性物质沿预设的移动路径到达目标位置的技术.该

技术目前主要用于心血管介入治疗、肺脏疾病的穿刺和局部治疗、胃肠道磁控胶囊内镜的导航等.导航磁体(navigation magnet, NM)与响应磁体(response magnet, RM)是构成磁导航系统的两大基本要素.导航磁体主要用于提供移动、可控的磁场,可以由永磁体提供,也可以由电磁装置提供.响应磁体(RM)作为导航磁体(NM)的磁场耦合对象是受力装置,常加载于检查或操作设备上,在导航磁体的引导下响应磁体可带动检查或操作设备精准运行于人体的空腔器官如心血管系统、消化管腔、气管-支气管腔、泌尿道、生殖道等(图3).

2.3 磁锚定技术

磁锚定技术(magnetic anchor technique, MAT)是利用磁体与磁体,或磁体与顺磁性物质之间的磁场吸引力,使锚定磁体对靶磁体进行非接触性空间锚定的技术.锚定磁体(anchor magnet, AM)在磁锚定系统中作为主动部分,根据所需磁力的大小和磁力特点可为永磁装置,也可为电磁装置.靶磁体(target magnet, TM)为被动部分,往往体积设计受限,因此常选用强力磁体,如钕铁硼磁体.有时为满足特殊需求下的锚定,液磁也可作为靶磁体.根据锚定实现部位的不同,磁锚定技术分为外锚定和内锚定两大类.外锚定技术(external anchor technique)常用于腔镜手术时体外锚定磁体对胸腔、腹腔、盆腔内的抓钳的锚定,以实现减戳卡或充分显露术野的目的.当靶磁体

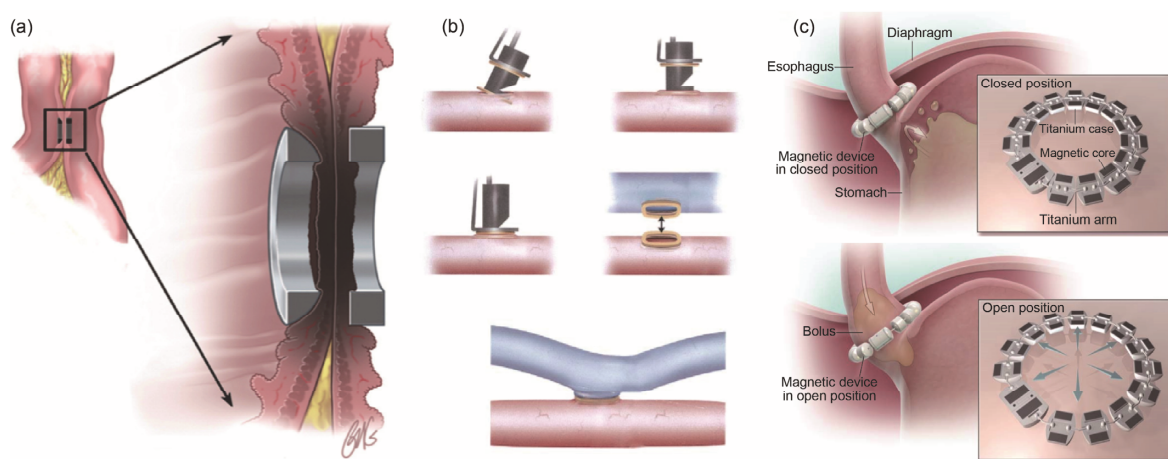


图2 磁压榨技术应用范例. (a) 磁压榨小肠侧侧吻合示意图^[64]; (b) 磁压榨血管侧侧吻合示意图^[34]; (c) 食管下段括约肌磁性增强装置^[68]

Figure 2 Application example of magnetic compression technology. (a) Schema of the magnamosis devices in the bypass limb of small intestine^[64]; (b) schema of the side-to-side anastomosing of the artery and vein by magnetic ring^[34]; (c) magnetic device for augmentation of the lower esophageal sphincter^[68]



图3 磁导航相关设备。(a) 美国Stereotaxis公司的Niboe[®]机器人磁导航系统^[49]；(b) 磁导航胶囊内窥镜测试装置^[49]；(c) 电磁导航支气管镜检查与CT扫描 3D气道重建相连接显示患者探针位置^[69]

Figure 3 Magnetic navigation related equipment. (a) Robotic magnetic navigation system (Niboe[®], Stereotaxis, Inc., USA)^[49]; (b) experimental set-up adopted for preliminary magnetic navigation tests of the endoscopic capsule^[49]; (c) initial registration phase of Electromagnetic Navigation Bronchoscopy (ENB) to link three-dimensional (3-D) reconstructed airways and CT scan to probe position within the patient^[69]

本身，或靶磁体和锚定磁体均位于腔道内时，我们称其为内锚定技术(internal anchor technique)。如胃肠锚定穿刺技术^[70~72]和MAG-ESD技术^[73]。外锚定和内锚定的示例见图4。

2.4 磁悬浮技术

同极相斥、异极相吸是磁场力最基本的特性。前面所述的磁压榨技术、磁导航技术及磁锚定技术均利用了磁场力异极相吸的原理。磁悬浮技术(magnetic levitation technique, MLT)则是利用磁体之间同极相斥的原理，借助磁性装置在组织之间产生相互排斥的力，以实现特殊医学诊疗的目的。由于磁体斥力的稳定性小于吸力的稳定性，所以对于磁悬浮相关技术的磁性装置的设计及实施应用往往更为复杂。磁悬浮颈椎间隙扩张装置便是基于磁悬浮技术设计的^[75]。

2.5 磁示踪技术

磁示踪技术(magnetic tracer technique, MTT)是利用液态磁体或磁性造影剂的液体属性，将其注射到人体管腔或与管腔相通的脏器内，液体磁性物质沿着管腔扩散和流动，利用体外检测设备对其进行监测和追踪，以实现疾病的诊断和治疗的目的。磁示踪技术目前在临床上主要用于乳腺癌前哨淋巴结示踪^[59~61]。

磁体之间产生的特殊形式的“非接触性”力，是磁外科技术应用的根本。隔物发力(包括相吸和相斥)的特点使磁压榨技术在空腔脏器吻合中突破了固有吻合模式的缺点，一方面实现了非组织损伤下吻合，这正是磁压榨技术在感染状态下能够完成一期吻合的原因；另一方面，借助内镜和介入操作，磁压榨技术可简便灵活地实现空腔脏器吻合，这正是磁压榨技

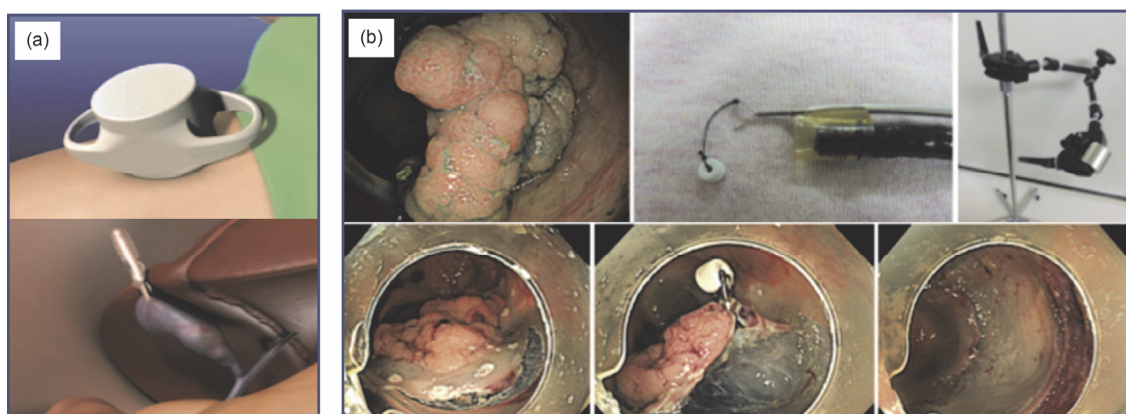


图4 磁锚定技术。(a) 磁锚定技术用于腹腔镜胆囊切除术^[74]；(b) 磁锚定内镜下黏膜切除术^[73]

Figure 4 Magnetic anchor technique. (a) Magnetic anchorage technique for laparoscopic cholecystectomy^[74]; (b) magnetic anchor-guided for endoscopic submucosal dissection (MAG-ESD)^[73]

术与现有技术相比所具备的不可替代的优势. 在充分理解磁力所具有的隔物发力的特点后, 磁锚定技术、磁导航技术、磁悬浮技术、磁示踪技术被开发并灵活运用在医学诊疗中, 成为磁外科发展的生命力.

3 磁外科学关键基础问题研究

3.1 磁性材料体内可植入表面改性研究

磁外科相关的磁性材料目前主要包括稀土永磁材料(钕铁硼材料和钕铁硼材料)、四氧化三铁磁性纳米颗粒、电磁、液磁及可降解磁性材料等, 其中烧结型稀土钕铁硼永磁材料磁学性能优良, 因此应用最为

普遍. 钕铁硼作为磁性材料体内植入基本涵盖了整个人体的空腔脏器和组织间隙. 根据应用技术的不同, 磁体体内留置时间短则数分钟、长则终生. 笔者总结了磁外科相关技术中磁体所处外环境和现有研究中采用的磁体表面改性方案¹⁾. 表2列出了不同磁外科技术下磁体的外环境¹⁾. 由于磁体在体内留置期间面临着复杂的物理、化学和生物环境, 所以不能简单套用工业上磁体表面改性处理评价标准, 但现在还没有磁性材料体内植入较为完善的统一标准. 表3列举了一些国内外文献中钕铁硼所用表面改性方案¹⁾. 图5为相关文献中涉及的表面改性后的钕铁硼磁体.

由上可以看出, 虽然研究者对磁体采用的表面

表2 磁外科相关技术中磁体外环境

Table 2 The environment of the magnets which was related to the magnetic surgery

MS	使用领域	磁体外环境
MCT	血管侧侧吻合 ^[36] 、胃肠吻合 ^[64] 、小肠吻合 ^[76] 、结肠吻合 ^[67] 、膀胱造瘘 ^[77] 、食管狭窄/闭锁再通 ^[8] 、胆道狭窄/闭锁再通 ^[20] 、胆肠吻合 ^[23] 、胰肠吻合、消化道造瘘 ^[78] 、消化道瘘口修补 ^[46] 、抗胃食管返流 ^[68] 、血管端端吻合 ^[39] 等	血管腔 ^{d)} 、胃腔 ^{b)} 、肠腔 ^{b)} 、输尿管/膀胱 ^{b)} 、食管 ^{b)} 、胆道 ^{c)/b)} 、胰管 ^{c)/b)} 、腹腔 ^{b)/d)} 、胸腔 ^{d)} 、组织间隙 ^{d)} 等
MAT	口腔正畸 ^[79] 、减瓣手术 ^[53] 、骨骼畸形矫正 ^[58] 、磁锚定辅助内镜下黏膜切除术 ^[73] 等	口腔 ^{d)} 、腹腔 ^{a)} 、胸腔 ^{a)} 、组织间隙 ^{b)} 、消化道 ^{a)} 等
MNT	磁导航磁性导管与磁控胶囊内镜 ^[49] 、磁导航支气管镜 ^[69] 等	血管腔 ^{a)} 、呼吸道 ^{a)} 、消化道 ^{a)} 等
MLT	颈椎间隙扩张装置 ^[75] 、人工关节等	组织间隙 ^{b)/d)} 、关节腔 ^{b)/d)} 等
MTT	淋巴示踪 ^[61] 、消化道造影	组织间隙 ^{a)} 、胃肠道 ^{a)}

a) 暂时留置: 留置时间通常小于72 h; b) 短期留置: 留置时间通常小于30 d; c) 中长期留置: 留置时间通常在30~90 d; d) 长期留置: 留置时间在90 d以上

表3 医用钕铁硼表面改性现状

Table 3 Surface modification of medical NdFeB

作者	应用对象	植入部位	改性方案	留置时间(d)
Avaliani等人 ^[23]	人体	胆道、十二指肠	聚氨酯	7~10
Graves等人 ^[76]	人体	小肠	聚碳酸酯	17~85
Matsuzaki等人 ^[73]	犬	胃	聚酰胺	<1
Yan等人 ^[46]	人体	阴道	氮化钛	16
Klima等人 ^[36]	人体	血管	氮化钛	永久
Ganz等人 ^[68]	人体	腹腔	钛壳	永久
Wang等人 ^[39]	犬	腹腔	氮化钛+钛壳	180
Liu等人 ^[38]	犬	腹腔	氮化钛+聚丙烯壳	180
Fan等人 ^[26]	犬	胆道、空肠	氮化钛+金属壳	14
Uygun等人 ^[78]	大鼠	胃、腹膜外	镀铬	20
Jamshidi等人 ^[64]	猪	小肠	聚四氟乙烯	7~14
严小鹏等人 ^[45]	猪	阴道	氮化钛/镍	14~28
严小鹏等人 ^[72]	犬	胃	镍	14

1) 刘豪, 付珊, 付琴琴, 等. 医用钕铁硼体内植入表面改性研究现状. 现代生物医学进展(已接收)

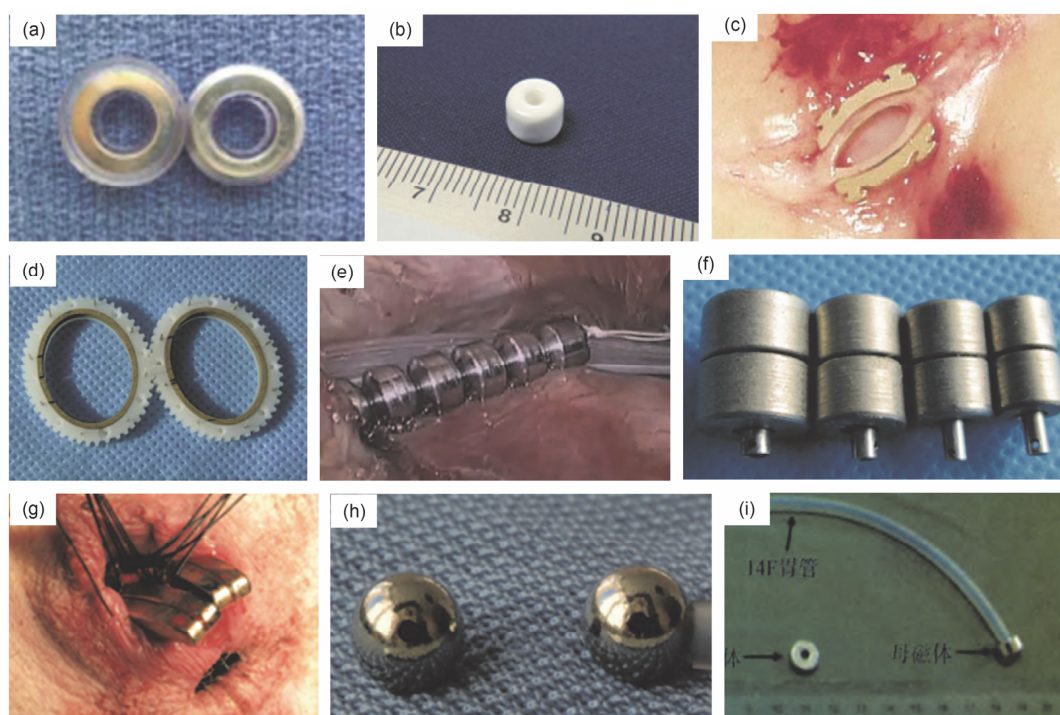


图5 磁外科相关技术中钕铁硼磁体所用到的表面改性方法. (a) 聚碳酸酯^[76]; (b) 聚酰胺^[73]; (c) 氮化钛^[36]; (d) 氮化钛+聚丙烯^[38]; (e) 钛壳^[68]; (f) 氮化钛和电工纯铁^[26]; (g) 氮化钛^[45]; (h) 铬^[78]; (i) 镍^[72]

Figure 5 The technology of NdFeB surface modification related to magnetic surgery. (a) Polycarbonate^[76]; (b) polyamide^[73]; (c) titanium nitride^[36]; (d) titanium nitride+polypropylene^[38]; (e) titanium^[68]; (f) titanium nitride and electrical pure iron^[26]; (g) titanium nitride^[45]; (h) chrome^[78]; (i) nickel^[72]

改性处理方法多种多样,但未见有客观、全面评价各种表面改性后的磁体生物相容性的文献,说明研究人员对此关注投入不够,忽略了表面改性研究的重要性.在磁外科进入到学科建设阶段后,磁性材料体内植入标准将有望建立并在世界范围内取得统一.

3.2 磁体设计问题

在磁外科技术体系中,磁体设计应考虑到三大因素:空间因素、功能需求和磁力需求.空间因素决定着磁体的大小,例如在磁压榨技术中,当借助内镜操作实现胃肠吻合时,要获得较大的吻合口尺寸就要尽可能大的磁体,但在实际操作时受到食管解剖尺寸和镜下操作的限制,磁体难以做到理想尺寸.但根据磁体的某些特性,可以从装置结构上进行优化设计.图6所示即为可变形磁体设计方案^[80],巧妙解决了操作空间的局限性与吻合需求之间的矛盾.功能需求决定了磁体的形状,在同为血管侧侧吻合中,当需要吻合后立即建立吻合通路时,则应采用磁环的结构^[34],否则,通道如可延期建立,则可选择非环状磁体^[40].随着磁外科研究深度和广度的不断拓展,

磁力需求越来越被研究者关注,实践方式也由原来的经验式向现在的科学分析阶段转换.当磁体一旦加工完成后,影响磁体间磁力的唯一因素就是磁体间的空间距离,落脚到临床应用中,空间距离就是组织间的厚度.Lambe等人^[81]利用专门研发的在线磁力计算工具来计算磁压榨技术中压力和压强随空间距离改变的规律,并基于现有文献资料分析了磁压榨胃肠吻合和胆肠吻合中所用到的磁力大小,这对以后磁体设计和磁力分析具有重要参考价值.

3.3 磁生物学效应机制研究

在磁学中,研究人员将磁场强度不随时间变化的磁场定义为稳态磁场.与之相对,磁场强度随时间变化的磁场称之为动态磁场^[82].在磁外科病人中主要涉及到的是稳态磁场.人类赖以生存的地磁场大约为50 μT ,当磁体被植入人体后,磁体周围的细胞大约承受数百至数千高斯的磁场(一般最高不超过5000 Gs),在此将对人体正常细胞、肿瘤细胞以及神经电生理活动产生怎样的影响?相关研究表明,不同细胞对不同强度磁场的响应有明显差异.但目前

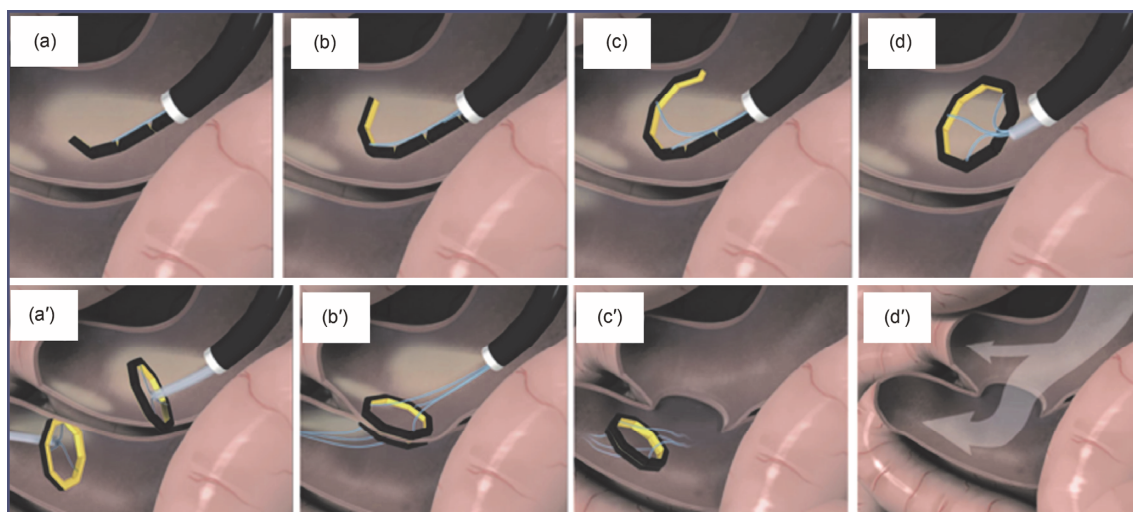


图6 微创双通路自组装磁体^[80]

Figure 6 Minimally invasive entero-enteral dual-path bypass using self-assembling magnets^[80]

国内外较为统一的认识是稳态磁场对人体的影响是较温和的,而且很多情况下是有益的^[82].美国FDA已将稳态磁场的安全强度限制提高到了8 T,这回答了磁外科临床应用的安全性问题.有研究发现,100 mT稳态磁场对荷瘤小鼠每天曝光3~6 h,持续4周以上后能够明显抑制肿瘤生长^[83].张欣^[82]实验室也发现1 T稳态磁场对多种肿瘤细胞产生抑制效果,但对非肿瘤细胞影响较小.虽然磁场对肿瘤细胞内部分子生物学的影响机制目前尚不明确,但可以预见的是,稳态磁场的生物学效应很有可能会被用于疾病的治疗中来,而这有望拓展出磁外科研究新领域.

4 不足与展望

历经40年的发展,磁外科技术的先进性已被国内外同行所认可,但磁外科发展过程中所存在的问题也已日益清晰地暴露在研究者们面前.如同内镜学、显微外科学的发展一样,如何能够促进一门新兴技术的快速健康发展?答案只有一个:利用跨学科交叉整合来创建磁外科学体系.只有将磁外科提升到学科化建设的高度,才能有效整合其他学科的先进理论和技术为磁外科所用,才能形成系统化的磁外科体系,才能将技术问题升华到科学问题上来,进

而通过科学理论来指导技术的进步.

在磁外科学体系的构建中,尚有以下关键问题亟待明确和解决:第一,针对部分磁外科技技术如磁压榨狭窄胆道疏通、磁压榨消化道吻合、磁锚定减戳腹腔镜手术等临床相对成熟的技术,亟待建立临床应用操作规范和临床质量控制标准,以指导临床实践,确保相关技术的临床安全性和可靠性;第二,夯实安全性研究,如建立磁性材料体内植入标准、明确体内植入稳态磁场后对机体的电生理活动及细胞学行为的磁场剂量-效应关系;第三,充分整合材料学、磁学、生物力学等相关学科优势,协助解决磁外科发展中面临的跨学科难题;第四,成立磁外科技专业委员会,加强国内外合作与交流,统筹磁外科的整体发展走向,制定阶段性磁外科发展规划.

我国的磁外科已在理论创新、发展规划、新技术建立方面走在了世界前列,在世界磁外科中具有举足轻重的地位,当下是世界各地磁外科研究机构快速发展的阶段,能否抓住时代际遇,突破磁外科发展瓶颈问题,抢占磁外科核心技术的制高点,将决定着未来5年磁外科技术的世界格局分布.我国磁外科研究人员应统一思想、合作交流、开拓创新,努力使我国保持世界磁外科领导者角色.

致谢 感谢中国科学院物理研究所沈保根研究员对创建磁外科学体系给予的鼓励和支持.

参考文献

- 1 Obora Y, Tamaki N, Matsumoto S. Nonsuture microvascular anastomosis using magnet rings: Preliminary report. *Surg Neurol*, 1978, 9: 117–120
- 2 Jansen A, Keeman J N, Davies G A, et al. Early experiences with magnetic rings in resection of the distal colon. *Neth J Surg*, 1980, 32: 20–27
- 3 Jansen A, Brummelkamp W H, Davies G A, et al. Clinical applications of magnetic rings in colorectal anastomosis. *Surg Gynecol Obstet*, 1981, 153: 537–545
- 4 Cope C. Creation of compression gastroenterostomy by means of the oral, percutaneous, or surgical introduction of magnets: Feasibility study in swine. *J Vasc Interv Radiol*, 1995, 6: 539–545
- 5 Fan C, Ma J, Zhang H K, et al. Sutureless intestinal anastomosis with a novel device of magnetic compression anastomosis. *Chin Med Sci J*, 2011, 26: 182–189
- 6 Bai J G, Huo X W, Ma J, et al. Magnetic compression technique for colonic anastomosis in rats. *J Surg Res*, 2018, 231: 24–29
- 7 Takamizawa S, Yamanouchi E, Muraji T, et al. MCRA of an anastomotic stenosis after esophagoesophagostomy for long gap esophageal atresia: A case report. *J Pediatr Surg*, 2007, 42: 769–772
- 8 Zaritzky M, Ben R, Zylberg G I, et al. Magnetic compression anastomosis as a nonsurgical treatment for esophageal atresia. *Pediatr Radiol*, 2009, 39: 945–949
- 9 Dorman R M, Vali K, Harmon C M, et al. Repair of esophageal atresia with proximal fistula using endoscopic magnetic compression anastomosis (magnamosis) after staged lengthening. *Pediatr Surg Int*, 2016, 32: 525–528
- 10 Woo R, Wong C M, Trimble Z, et al. Magnetic compression stricturoplasty for treatment of refractory esophageal strictures in children: Technique and lessons learned. *Surg Innov*, 2017, 24: 432–439
- 11 Ellebaek M B B, Qvist N, Rasmussen L. Magnetic compression anastomosis in long-gap esophageal atresia gross type A: A case report. *European J Pediatr Surg Rep*, 2018, 6: e37–e39
- 12 Mimuro A, Tsuchida A, Yamanouchi E, et al. A novel technique of magnetic compression anastomosis for severe biliary stenosis. *Gastrointest Endosc*, 2003, 58: 283–287
- 13 Muraoka N, Uematsu H, Yamanouchi E, et al. Yamanouchi magnetic compression anastomosis for bilioenteric anastomotic stricture after living-donor liver transplantation. *J Vasc Interv Radiol*, 2005, 16: 1263–1267
- 14 Itoi T, Yamanouchi E, Ikeda T, et al. Magnetic compression anastomosis: A novel technique for canalization of severe hilar bile duct strictures. *Endoscopy*, 2005, 37: 1248–1251
- 15 Okajima H, Kotera A, Takeichi T, et al. Magnet compression anastomosis for bile duct stenosis after duct-to-duct biliary reconstruction in living donor liver transplantation. *Liver Transpl*, 2005, 11: 473–475
- 16 Matsuno N, Uchiyama M, Nakamura Y, et al. A nonsuture anastomosis using magnetic compression for biliary stricture after living donor liver transplantation. *Hepatogastroenterology*, 2009, 56: 47–49
- 17 Marubashi S, Nagano H, Yamanouchi E, et al. Salvage cystic duct anastomosis using a magnetic compression technique for incomplete bile duct reconstruction in living donor liver transplantation. *Liver Transpl*, 2010, 16: 33–37
- 18 Itoi T, Yamanouchi E, Ikeuchi N, et al. Magnetic compression duct-to-duct anastomosis for biliary obstruction in a patient with living donor liver transplantation. *Gut Liver*, 2010, 4(Suppl 1): S96–S98
- 19 Jang S I, Kim J H, Won J, et al. Magnetic compression anastomosis is useful in biliary anastomotic strictures after living donor liver transplantation. *Gastrointest Endosc*, 2011, 74: 1040–1048
- 20 Oya H, Sato Y, Yamanouchi E, et al. Magnetic compression anastomosis for bile duct stenosis after donor left hepatectomy: A case report. *Transplant Proc*, 2012, 44: 806–809
- 21 Parlak E, Koksall A S, Kucukay F, et al. A novel technique for the endoscopic treatment of complete biliary anastomosis obstructions after liver transplantation: through-the-scope magnetic compression anastomosis. *Gastrointest Endosc*, 2017, 85: 841–847
- 22 Li J, Lv Y, Qu B, et al. Application of a new type of sutureless magnetic biliary-enteric anastomosis stent for one-stage reconstruction of the biliary-enteric continuity after acute bile duct injury: An experimental study. *J Surg Res*, 2008, 148: 136–142
- 23 Avaliani M, Chigogidze N, Nechipai A, et al. Magnetic compression biliary-enteric anastomosis for palliation of obstructive jaundice: Initial clinical results. *J Vasc Interv Radiol*, 2009, 20: 614–623
- 24 Suyama K, Takamori H, Yamanouchi E, et al. Recanalization of obstructed choledochojejunostomy using the magnet compression anastomosis technique. *Am J Gastroenterol*, 2010, 105: 230–231
- 25 Fan C, Yan X P, Liu S Q, et al. Roux-en-Y choledochojejunostomy using novel magnetic compressive anastomats in canine model of obstructive jaundice. *Hepatobiliary Pancreat Dis Int*, 2012, 11: 81–88
- 26 Fan C, Zhang H, Yan X, et al. Advanced Roux-en-Y hepaticojejunostomy with magnetic compressive anastomats in obstructive jaundice dog models. *Surg Endosc*, 2018, 32: 779–789
- 27 Itoi T, Kasuya K, Sofuni A, et al. Magnetic compression anastomosis for biliary obstruction: Review and experience at Tokyo Medical

- University Hospital. *J Hepatobiliary Pancreat Sci*, 2011, 18: 357–365
- 28 Falk V, Walther T, Stein H, et al. Facilitated endoscopic beating heart coronary artery bypass grafting using a magnetic coupling device. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2003, 126: 1575–1579
- 29 Klima U, Falk V, Marinka M, et al. Magnetic vascular coupling for distal anastomosis in coronary artery bypass grafting: A multicenter trial. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2003, 126: 1568–1574
- 30 Klima U, Marinka M, Bagaev E, et al. Total magnetic vascular coupling for arterial revascularization. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2004, 127: 602–603
- 31 Filsoufi F, Farivar R S, Aklog L, et al. Automated distal coronary bypass with a novel magnetic coupler (MVP system). *Thorac Cardiovasc Surg*, 2004, 127: 185–192
- 32 Wong T, Mayet J, Casula R P. Minimal invasive direct revascularisation of the left anterior descending artery using a novel magnetic vascular anastomotic device. *Heart*, 2004, 90: 632
- 33 Casselman F P, Meco M, Dom H, et al. Multivessel distal sutureless off-pump coronary artery bypass grafting procedure using magnetic connectors. *Ann Thorac Surg*, 2004, 78: e38–e40
- 34 Erdmann D, Sweis R, Heitmann C, et al. Side-to-side sutureless vascular anastomosis with magnets. *J Vasc Surg*, 2004, 40: 505–511
- 35 Athanasiou T, Ashrafian H, Glenville B, et al. Coronary artery bypass with the use of a magnetic distal anastomotic device: Surgical technique and preliminary experience. *Heart Surg Forum*, 2004, 7: 356–359
- 36 Klima U, MacVaugh H, Bagaev E, et al. Magnetic vascular port in minimally invasive direct coronary artery bypass grafting. *Circulation*, 2004, 110(Suppl 1): II55–II60
- 37 Shi Y, Lv Y, Wang B, et al. Novel magnetic rings for rapid vascular reconstruction in canine liver transplantation model. *Transplant Proc*, 2006, 38: 3070–3074
- 38 Liu S Q, Fan C, Lei P, et al. Nonsuture anastomosis of arteries and veins using the magnetic pinned-ring device: A histologic and scanning electron microscopic study. *Ann Vasc Surg*, 2012, 26: 985–995
- 39 Wang S P, Yan X P, Xue F, et al. Fast magnetic reconstruction of the portal vein with allogeneic blood vessels in canines. *Hepatobiliary Pancreat Dis Int*, 2015, 14: 293–299
- 40 Yan X, Fan C, Ma J, et al. Portacaval shunt established in six dogs using magnetic compression technique. *PLoS One*, 2013, 8: e76873
- 41 Yan X P, Liu W Y, Ma J, et al. Extrahepatic portacaval shunt via a magnetic compression technique: A cadaveric feasibility study. *World J Gastroenterol*, 2015, 21: 8073–8080
- 42 Yan X P, Lü Y, Ma J, et al. The development of extrahepatic portacaval shunt device based on magnetic compression technique through the interventional procedure (in Chinese). *Chin J Med Instrument*, 2013, 37: 421–422, 436 [严小鹏, 吕毅, 马佳, 等. 基于磁压榨技术的介入下肝外门腔分流器械的研制. *中国医疗器械杂志*, 2013, 37: 421–422, 436]
- 43 Liu S Q, Lei P, Cui X H, et al. Sutureless anastomoses using magnetic rings in canine liver transplantation model. *J Surg Res*, 2013, 185: 923–933
- 44 Shi Y, Zhang W, Deng Y L, et al. Magnetic ring anastomosis of suprahepatic vena cava: Novel technique for liver transplantation in rat. *Transpl Int*, 2015, 28: 89–94
- 45 Yan X P, Gao Y F, Zou Y L, et al. Rectovaginal fistula stage-one repair device based on magnetic compression technique (in Chinese). *J Biomed Eng*, 2015, 32: 1096–1099 [严小鹏, 高燕凤, 邹余粮, 等. 基于磁压榨技术的直肠阴道瘘一期修补装置. *生物医学工程学杂志*, 2015, 32: 1096–1099]
- 46 Yan X P, Zou Y L, She Z F, et al. Magnet compression technique: A novel method for rectovaginal fistula repair. *Int J Colorectal Dis*, 2016, 32: 937–938
- 47 She Z F, Yan X P, Ma F, et al. Treatment of rectovaginal fistula by magnetic compression. *Int Urogynecol J*, 2017, 28: 241–247
- 48 Fu S, Ma J, Zhao G, et al. Improved design of rectovaginal fistula repair device based on magnetic compression technique (in Chinese). *China Med Devices*, 2018, 33: 46–49 [付珊, 马佳, 赵广宾, 等. 磁压榨直肠阴道瘘闭合修补装置的改良设计. *中国医疗设备*, 2018, 33: 46–49]
- 49 Carpi F, Pappone C. Stereotaxis Niobe® magnetic navigation system for endocardial catheter ablation and gastrointestinal capsule endoscopy. *Expert Rev Med Devices*, 2009, 6: 487–498
- 50 Dominguez G, Durand L, De Rosa J, et al. Retraction and triangulation with neodymium magnetic forceps for single-port laparoscopic cholecystectomy. *Surg Endosc*, 2009, 23: 1660–1666
- 51 Padilla B E, Dominguez G, Millan C, et al. The use of magnets with single-site umbilical laparoscopic surgery. *Semin Pediatr Surg*, 2011, 20: 224–231
- 52 Arain N A, Cadeddu J A, Hogg D C, et al. Magnetically anchored cautery dissector improves triangulation, depth perception, and workload during single-site laparoscopic cholecystectomy. *J Gastrointest Surg*, 2012, 16: 1807–1813
- 53 Shang Y, Guo H, Zhang D, et al. An application research on a novel internal grasper platform and magnetic anchoring guide system (MAGS) in laparoscopic surgery. *Surg Endosc*, 2017, 31: 274–280
- 54 Best S L, Cadeddu J A. Use of magnetic anchoring and guidance systems to facilitate single trocar laparoscopy. *Curr Urol Rep*, 2010, 11: 29–32
- 55 Harrison M R, Estefan-Ventura D, Fechter R, et al. Magnetic mini-mover procedure for pectus excavatum: I. Development, design, and

- simulations for feasibility and safety. *J Pediatr Surg*, 2007, 42: 81–85
- 56 Harrison M R, Curran P F, Jamshidi R, et al. Magnetic mini-mover procedure for pectus excavatum II: Initial findings of a Food and Drug Administration-sponsored trial. *J Pediatr Surg*, 2010, 45: 185–191
 - 57 Harrison M R, Gonzales K D, Bratton B J, et al. Magnetic mini-mover procedure for pectus excavatum III: Safety and efficacy in a Food and Drug Administration-sponsored clinical trial. *J Pediatr Surg*, 2012, 47: 154–159
 - 58 Graves C E, Hirose S, Raff G W, et al. Magnetic mini-mover procedure for pectus excavatum IV: FDA sponsored multicenter trial. *J Pediatr Surg*, 2017, 52: 913–919
 - 59 Douek M, Klaase J, Monypenny I, et al. Sentinel node biopsy using a magnetic tracer versus standard technique: The SentiMAG Multicentre Trial. *Ann Surg Oncol*, 2014, 21: 1237–1245
 - 60 Ookubo T, Inoue Y, Kim D, et al. Characteristics of magnetic probes for identifying sentinel lymph nodes. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2013, 2013: 5485–5488
 - 61 Sekino M, Kuwahata A, Ookubo T, et al. Handheld magnetic probe with permanent magnet and Hall sensor for identifying sentinel lymph nodes in breast cancer patients. *Sci Rep*, 2018, 8: 1195
 - 62 Yamanouchi E, Kumano R, Kobayashi K, et al. Treatment for bowel or biliary obstruction by magnetic compression anastomosis development of Yamanouchi's method and its clinical evaluation (in Japanese). *J Nippon Med Sch*, 2002, 69: 471–475
 - 63 Chi Y D, Jing P, Wang Q B. Development and research status of medical NdFeB ring magnet (in Chinese). *Mater Heat Treatm*, 2012, 41: 77–78, 81 [迟煜嶙, 荆鹏, 汪强兵. 医用钕铁硼磁环的发展及应用现状. *热加工工艺*, 2012, 41: 77–78, 81]
 - 64 Jamshidi R, Stephenson J T, Clay J G, et al. Magnamosis: Magnetic compression anastomosis with comparison to suture and staple technique. *J Pediatr Surg*, 2009, 44: 222–228
 - 65 Yan X P, Liu W Y, Li D C, et al. Magnamosis combined with endoscopy: A new endoscopic technique in digestive surgery (in Chinese). *World Chin J Digestol*, 2014, 22: 2716–2721 [严小鹏, 刘雯雁, 李涤尘, 等. 消化外科手术的内镜化途径: 磁吻合联合内镜. *世界华人消化杂志*, 2014, 22: 2716–2721]
 - 66 Liu X M, Yan X P, Zhang H K, et al. Magnetic anastomosis for biliojejunostomy: First prospective clinical trial. *World J Surg*, 2018, doi: 10.1007/s00268-018-4710-y
 - 67 Zhang H, Tan K, Fan C, et al. Magnetic compression anastomosis for enteroenterostomy under peritonitis conditions in dogs. *J Surg Res*, 2017, 208: 60–67
 - 68 Ganz R A, Peters J H, Horgan S, et al. Esophageal sphincter device for gastroesophageal reflux disease. *N Engl J Med*, 2013, 369: 719–727
 - 69 Khan A Y, Berkowitz D, Krinsky W S, et al. Safety of pacemakers and defibrillators in electromagnetic navigation bronchoscopy. *Chest*, 2013, 143: 75–81
 - 70 Tugwell J, Brennan P, O'Shea C, et al. Electropermanent magnetic anchoring for surgery and endoscopy. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2015, 63: 842–848
 - 71 Yan X, Ren F, Liu W, et al. Gastrostomy in dogs with magnetic compression technique combined with endoscopy (in Chinese). *Chin J Gastrointest Surgery*, 2015, 18: 832–834 [严小鹏, 任冯刚, 刘雯雁, 等. 磁压榨技术联合内镜实施犬胃造瘘术. *中华胃肠外科杂志*, 2015, 18: 832–834]
 - 72 Yan X P, Ren F G, Liu W Y, et al. Application of magnetic anchor combining magnetic compression technique in ultra minimal invasive gastrostomy: An experimental study (in Chinese). *Chin J Exp Surg*, 2016, 33: 291–293 [严小鹏, 任冯刚, 刘雯雁, 等. 磁锚定技术联合磁压榨技术实现超微创胃造瘘. *中华实验外科杂志*, 2016, 33: 291–293]
 - 73 Matsuzaki I, Hattori N, Hirose K, et al. Magnetic anchor-guided endoscopic submucosal dissection for gastric lesions (with video). *Gastrointest Endosc*, 2018, 87: 1576–1580
 - 74 Rivas H, Robles I, Riquelme F, et al. Magnetic surgery: Results from first prospective clinical trial in 50 patients. *Ann Surg*, 2018, 267: 88–93
 - 75 Lü J, Wang S, Zhou X Q. Magnetic suspension cervical intervertebral space expansion device (in Chinese). *PRC Patent*, CN201510021978.0, 2016-11-16 [吕晶, 王帅, 周晓琴. 一种磁悬浮颈椎间隙扩张装置. 中国专利, CN201510021978.0, 2016-11-16]
 - 76 Graves C E, Co C, His R S, et al. Magnetic compression anastomosis (magnamosis): First-in-human trial. *J Am Coll Surg*, 2017, 225: 676–681
 - 77 Uygun I, Okur M H, Cimen H, et al. Magnetic compression ostomy as new cystostomy technique in the rat: Magnacystostomy. *Urology*, 2012, 79: 738–742
 - 78 Uygun I, Okur M H, Cimen H, et al. Magnetic compression gastrostomy in the rat. *Pediatr Surg Int*, 2012, 28: 529–532
 - 79 Liu Y, Zheng P L. The application of magnetic material in orthodontics (in Chinese). *Chin J Dental Mater Devices*, 1999, 8: 40–42 [刘奕, 郑蓬莱. 磁性材料在口腔正畸中的应用. *口腔材料器械杂志*, 1999, 8: 40–42]
 - 80 Ryou M, Aihara H, Thompson C C. Minimally invasive entero-enteral dual-path bypass using self-assembling magnets. *Surg Endosc*, 2016, 30: 4533–4538
 - 81 Lamber T, Riordain M G, Cahill R A, et al. Magnetic compression in gastrointestinal and bilioenteric anastomosis: How much force? *Surg Innov*, 2014, 21: 65–73
 - 82 Zhang X, Yarema K, Xu A. *Biological Effects of Static Magnetic Fields*. Berlin: Springer Press, 2017
 - 83 Tatarov I, Panda A, Petkov D, et al. Effect of magnetic fields on tumor growth and viability. *Comp Med*, 2011, 61: 339–345

Summary for “磁外科学体系的探索与建立”

Exploration and establishment of magnetic surgery

Xiaopeng Yan^{1,2,3}, Peng Shang⁴, Aihua Shi^{2,3}, Wenyan Liu^{1,2,3}, Yaxiong Liu⁵ & Yi Lü^{1,2,3*}¹ Department of Hepatobiliary Surgery, the First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China;² National Local Joint Engineering Research Center for Precision Surgery & Regenerative Medicine, Xi'an 710061, China;³ Shaanxi Province Center for Regenerative Medicine and Surgery Engineering Research, Xi'an 710061, China;⁴ Research & Development Institute Northwestern Polytechnical University in Shenzhen, Shenzhen 710072, China;⁵ State Key Laboratory for Mechanical Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

* Corresponding author, E-mail: luyi169@126.com

In the 21st century, the application of magnetic devices in surgery has been increasingly reported. Among these innovative magnetic devices, many have shown great superiority and subversiveness. Now there is a trend that these innovative techniques may replace traditional techniques. Some advanced magnetic surgical techniques can vastly simplify existing surgical procedures, lower operation difficulty, shorten operation time and improve treatment effect. Others may even challenge the current treatment mode of some diseases. And the concept of magnetic surgery has been changed rapidly. Nevertheless, many common vital bottleneck problems remain unsolved in this new area. The fundamental research on the biologic effects of magnets is far from sufficient. The core problems of magnetic techniques still hang in doubt. The cooperation and integration among institutes of medicine, science and engineering are lacking. The research results remain in certain areas and are more theoretical with little practicability. The last but not the least, the scientific conception and clinical application standards of this novel technique are still vacant. Recently, Chinese researchers have made systemic researches in magnetic surgery and invented a series of international leading techniques. They have achieved remarkable achievements in theoretical innovation and discipline construction, which have occupied the leading place in the world. This article was aimed at discussing the establishment and development of the international discipline of magnetic surgery. In the meantime, this article summarized the developing situation and foundation of magnetic surgery while created expectations. In this article, the authors firstly divided developmental stages of magnetic surgery in a scientific manner. The authors proposed five major systems of magnetic surgery and suggested establishing the discipline of magnetic surgery with interdisciplinary integration. The authors made all efforts to lay a solid foundation of basic researches, set up a theoretical system, standardize clinical researches, and strengthened interdisciplinary integration of magnetic materials, biomechanics and clinical diagnosis and treatment. The authors devoted themselves to unit experts on rare earth metals, biomechanics and clinical medicine. With the integration of multi-institutes, the discipline of magnetic surgery will be soon established normatively. Novel techniques of magnetic surgery will be carried out in clinical application researches. In the near future, the fast development of magnetic surgery will be achieved and benefit human health.

Magnetic surgery, neodymium iron boron, magnetic anastomosis technique, magnetic anchoring technique, magnetic navigation technique

doi: 10.1360/N972018-00638