科学通报 2020 年 第 65 卷 第 13 期: 1173 ~ 1180

《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

香山科学会议专栏 进 展

第665次学术讨论会·磁外科学机遇和挑战

磁吻合技术及应用

张谔丰[1,2,3], 卢强[1,2,3], 李宇[1,2,3], 白纪纲[1,2,3], 张晓刚[1,2,3], 张欣[4], 樊超[1,2,3], 李建辉[2,3,5], 刘学民[1,2,3*]

1. 西安交通大学第一附属医院肝胆外科, 西安 710061;
2. 西安交通大学第一附属医院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. 西安交通大学第一附属医院陕西省再生医学与外科工程研究中心, 西安 710061;
4. 中国科学院合肥物质科学研究院, 强磁场科学中心, 合肥 230031;
5. 陕西省人民医院肿瘤外科, 西安 710068

* 联系人, E-mail: a1090224@163.com

2019-12-22 收稿, 2020-01-20 修回, 2020-01-21 接受, 2020-02-13 网络版发表

国家自然科学基金(81470896, 81700545, 30830099, 81127005, 51275387)和陕西省技术创新引导专项(2017CGZH-HJ-14)资助

摘要 磁外科(磁外科学)作为一门新兴的技术型学科, 以其广泛的应用前景得到了全世界众多研究者的关注. 磁外科技术按照其应用方式和原理的不同分为以下5大类: 磁压榨技术、磁导航技术、磁锚定技术、磁悬浮技术以及磁示踪技术. 其中, 磁压榨技术利用磁力的特殊性质来完成临床上某些特定的操作, 如脏器的连接再通、组织的压榨闭合、管腔内容物的限流等. 磁吻合技术作为磁压榨技术的重要分支, 其本质是利用磁力代替缝线和钛钉的牵拉力来完成组织管腔吻合或再通的技术. 目前, 磁吻合在临床中主要应用于以下3个领域: 消化道管腔吻合、消化道闭塞/狭窄的再通以及血管吻合. 磁力消化道管腔可应用于不同消化道管腔之间的吻合, 将消化道管腔吻合由传统的"贯穿式"吻合转变成"非贯穿"吻合, 极大地简化了操作, 降低了术后并发症. 针对消化道管腔闭塞/狭窄疾病, 磁吻合技术为此类疾病提供了一种新的治疗策略, 无需通过开腹或者开胸便可完成管腔的再通, 极大地减轻了病人的创伤以及手术相关并发症的发生, 甚至可以为某些传统方法无法治疗的疾病提供解决方案. 除此之外, 磁吻合技术还可应用于血管的端-端、端-侧以及侧-侧吻合, 吻合过程操作简便, 可在极短的时间内完成器官血流的重建, 缩短了靶器官的缺血或瘀血时间, 使得术后并发症显著减少, 该技术已在冠脉搭桥、门腔分流以及器官移植等手术中成功应用. 磁性装置的表面改性处理以及外形设计是磁吻合技术在临床应用的两大关键问题. 磁性装置的表面改性方案主要取决于其在生物体内停留的时间, 而磁性装置的外形设计主要取决于拟吻合管腔局部的解剖因素和磁体导入途径以及吻合所需要的磁力大小. 鉴于磁吻合技术在管腔吻合以及管腔闭塞疏通中的巨大应用潜质, 未来磁吻合技术将在为其他腔道(输尿管、尿道等)吻合或疏通方面提供新的治疗策略.

关键词 磁吻合, 磁压榨技术, 磁外科, 管腔重建

磁外科(magnetic surgery, MS, 磁外科学)是利用特殊设计的磁性医疗器械或设备, 将磁性物质间"非接触性"磁场力转化为临床诊疗中能够发挥特定功能的力, 从而完成组织压榨、器官锚定、管腔导航、间隙扩张、可控示踪等功能的新兴综合性技术学科[1]. 作为一门新兴的技术性学科, 磁外科在疾病的诊断和治疗中的巨大潜质得到了全世界众多研究者的关注, 尤其是随着强磁钕铁硼材料的出现, 各种不同的磁外科技术

引用格式: 张谔丰, 卢强, 李宇, 等. 磁吻合技术及应用. 科学通报, 2020, 65: 1173–1180
Zhang X F, Lu Q, Li Y, et al. Definition and application of magnetic compression anastomosis (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 1173–1180, doi: 10.1360/TB-2019-0857

© 2020《中国科学》杂志社

犹如雨后春笋般涌现出来并展现出了良好的应用效果. 按照不同应用方式和作用原理, 磁外科技术可分为以下5大类: 磁压榨技术、磁锚定技术、磁导航技术、磁悬浮技术以及磁示踪技术[2]. 磁吻合技术作为磁压榨技术的重要分支, 是指借助磁体之间的“非接触”磁力, 通过开腹(开胸)、内镜操作或介入技术来恢复管腔连续性的综合性技术. 目前, 磁吻合技术广泛应用于管腔吻合和管腔闭塞/狭窄再通并诞生了一系列新型的外科技术, 变革了传统的管腔吻合和管腔闭塞/狭窄再通方式, 已成功应用于消化道管腔吻合、消化道闭塞/狭窄再通以及血管吻合并显示出了良好的应用效果.

1 磁吻合在消化道重建中的应用

1.1 消化道管腔吻合

消化道管腔吻合是消化外科手术中最为常见的操作, 目前临床上常用的消化道管腔吻合方式包括手工缝合和机械吻合器吻合. 机械吻合器常用于管腔直径较大的胃肠道吻合, 如食管-胃吻合、胃-小肠吻合、小肠-小肠、小肠-结肠吻合以及结肠-结肠吻合. 与传统的手工缝合相比较, 机械吻合器显著降低了操作难度、缩短了吻合时间、降低了术后并发症的发生, 尤其在微创手术中, 机械吻合的优势更为明显[3]. 但是对于管腔直径较小的消化道管腔吻合, 如胆-肠吻合、胰-肠吻合, 目前临床已有的吻合器便无法进行吻合, 手工缝合仍然是主要的吻合方式, 但手工缝合操作复杂、术后并发症高发, 尤其以腹腔镜下操作更为困难[4,5]. 磁吻合技术在这种情况下应运而生. 磁吻合的本质为一种“非贯穿”式机械吻合, 在吻合过程中发生的病理生理变化为: 位于磁体之间的组织在磁力的挤压作用下逐渐开始出现缺血, 进而发生坏死, 而位于磁体周边的两侧吻合口组织则与之相伴随地发生粘连, 进而相互愈合, 完成管腔吻合(图1).

最早将磁吻合技术应用于胃-肠道吻合的是苏联学者Kanshin等人[6], 其于1978年利用磁吻合技术进行了犬胃十二指肠-空肠侧侧吻合术, 磁体在术后1周内顺利排出, 吻合口组织学检查显示愈合良好. 1981年, 美国学者Jansen等人[7]利用特殊设计的磁性装置进行了动物小肠吻合, 其所用的吻合装置为涂有聚酯涂层的稀土钴磁环, 吻合结束后, 磁体于术后3~4 d内排出, 进一步的组织学检查发现吻合口各层愈合良好, 未见吻合口瘘和狭窄的发生. 随后, 他们[8]利用相似的装置在

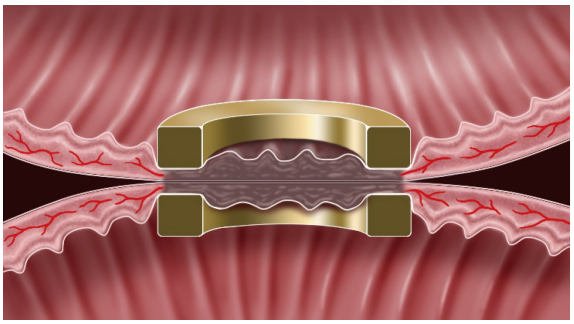


图 1 (网络版彩色)磁吻合技术示意图
Figure 1 (Color online) Schematic of magnetic compression anastomosis

临床上开展了21例结肠吻合, 所用的磁环直径分别为25, 28和30 mm, 术后有2例患者出现了吻合口裂开, 有1例患者因复发性心肌梗死而死亡, 其余患者术后恢复顺利. 1995年, 美国学者Cope[9]利用钕铁硼磁体通过经口、经皮穿刺或经外科手术的方式进行了胃肠吻合的动物实验, 术后未出现吻合口瘘、感染以及出血等并发症. 2009年, 美国学者Harrison团队[10]利用钕铁硼磁体进行了小肠的侧-侧吻合动物实验, 术后动物未出现吻合口瘘及狭窄, 组织学检查提示吻合口两侧之间的上皮细胞连接牢靠, 局部炎症反应较传统吻合方法轻. 此后, 陆续有学者利用该装置进行了空肠-空肠吻合[11]、胃-空肠吻合[11]、胃-结肠吻合[12]、十二指肠-结肠吻合[12]以及结肠-直肠吻合[13]并显示出良好的应用效果. 目前, 该磁性吻合装置已获得美国FDA批准并在临床中开始应用. 除此之外, 来自美国哈佛大学的学者Ryou等人[14]利用一种可实现“自组装”的磁性装置在内镜下通过自然腔道进行了肠道旁路手术的动物实验, 术后90天内观察未出现吻合口瘘、狭窄等并发症. 随后, Machytka等人[15]将该方法进行改良后为肥胖患者开展了部分空肠改道手术(partial jejunal diversion, PJD), 在术后1年的随访过程中患者体重平均下降17.6 kg, 而在合并糖尿病的患者中, 餐后血糖和糖化血红蛋白水平也显著降低, 但是部分患者在术后经历了一个短期的腹泻过程.

除了胃-肠道吻合之外, 消化道管腔吻合还包括胆-肠吻合、胰-肠吻合等管腔较小的消化道重建, 此类吻合不能利用目前市场已有的钉式吻合器进行吻合, 临床上仍然依靠传统的手工缝合来完成, 但此过程操作较为复杂, 术后并发症发生率高, 需要经过大量的训练才能掌握, 尤其以腹腔镜下操作更为困难. 磁吻合技术为此类消化道管腔吻合提供了一种新的解决方案, 将

手工缝合转变成了机械吻合，提高了吻合效率和质量. 2007年，李建辉等人[16]利用特殊设计的磁性吻合器在犬急性胆管损伤合并胆汁性腹膜炎模型中进行了胆-肠连续性的一期修复，结果显示该方法进行炎症状态下的胆-肠吻合安全可靠，术后无吻合口瘘和感染的发生，长期随访未见吻合口狭窄；进一步的组织学检查提示吻合口愈合良好，炎症反应轻，胶原排列整齐. 2012年，Fan等人[17]利用磁性吻合器在动物梗阻性黄疸模型中进行了Roux-en-Y胆肠吻合，并与传统的手工缝合进行了比较，结果显示利用磁吻合技术除可以显著缩短吻合时间之外，还可以显著降低吻合口瘘以及狭窄的发生. 2015年，Cui等人[18]在犬胰十二指肠切除术后利用磁吻合技术进行了胰-肠吻合，吻合时间显著缩短，术后未见胰瘘发生，组织学检查显示吻合口愈合良好. 2016年，Xue等人[19]通过动物实验发现胆-肠吻合的最适磁力压强为0.2~0.3 MPa，该研究为磁性胆-肠吻合装置的设计提供了重要的参数. 2017年，Zhang等人[20]设计了一种磁性胆-肠吻合器并成功应用于腹腔镜下犬胆-肠吻合，平均吻合时间为(12.9±1.73) min，术后磁性装置排出体外的时间为(14.5±2.08) d. 在上述动物实验的基础之上，Liu等人[21]在2012~2015年期间利用磁吻合技术在临床上开展了41例胆-肠吻合，平均吻合时间为10.5 min. 吻合口形成中位时间为19 d；吻合口形成后，磁性装置经消化道排出体外，体内无异物残留，磁性装置排出体外的中位时间为35 d，术后中位随访时间为547.5 d，随访期内未见吻合口相关并发症的发生. 与此同时，该研究团队[22]对4例患者在腹腔镜下开展了胆-肠磁吻合，中位吻合时间为12 min，术后中位随访时间为313 d，随访过程中未见吻合口相关并发症的发生. 此外，该研究团队[23]还在2016~2017年间利用磁吻合技术对4例患者进行了胰十二指肠切除术后胆-肠、胰-肠吻合(图2)，术后中位随访时间为313 d，有1例患者在术后11个月的时候出现了胆-肠吻合口狭窄，通过放置支架得到缓解，其余患者在随访过程中未见并发症的发生.

1.2 消化道狭窄/闭塞的开通

消化道狭窄/闭塞是外科中的常见疾病，其本质是由于各种原因导致的消化道连续性中断，食物或消化液不能顺利通过，进而导致的一系列疾病或病症. 传统的治疗方式为在开腹(胸)手术下通过管腔吻合恢复消化道连续性，此类手术创伤大、术后并发症高发、复发率较高，通常需要多次手术治疗；对于不能接受手术治疗的病例，则只能采取体外永久引流或造瘘以维持生命. 磁体之间可通过磁力在“非接触”的情况下相互吸引，这就为消化道狭窄/闭塞类疾病提供了一种新的治疗思路，即通过自然管腔或介入的方式将磁体放置至狭窄/闭塞部位的两侧，通过磁力之间的相互吸引使狭窄部位组织坏死、脱落便可解除梗阻，重新恢复管腔连续性(图3).

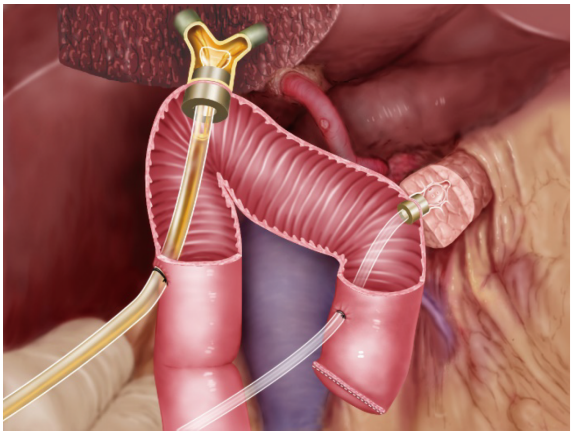


图 2 (网络版彩色)磁力胆-肠、胰-肠吻合
Figure 2 (Color online) Magnetic compression anastomosis in choledochojejunostomy and pancreaticojejunostomy

2001~2004年间，美国学者Zaritzky等人[24]利用磁吻合技术在临床上治疗了5例先天性食管闭锁患者，所有患者狭窄段长度均小于3 cm，狭窄上方磁体经口放

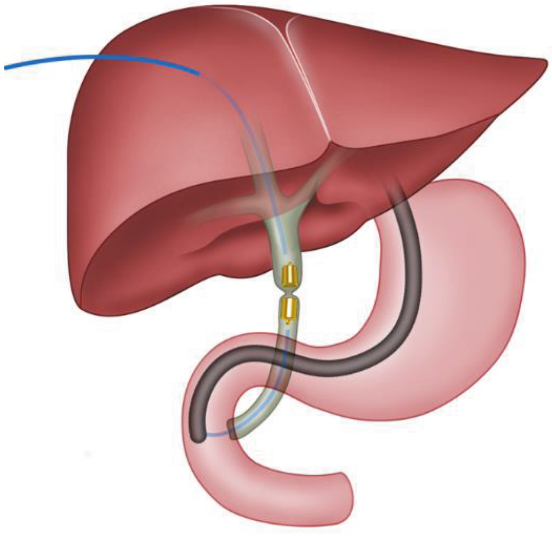


图 3 (网络版彩色)磁力胆道狭窄/闭塞再通技术
Figure 3 (Color online) Magnetic compression anastomosis in biliary stenosis/occlusion recanalization

入, 狭窄段下方磁体通过胃造瘘口放置; 吻合口形成平均时间为4.8 d; 其中4例患者得到了有效治疗, 1例患者因食管狭窄而接受了手术治疗. 刘仕琪等人[25]也利用相似的技术于2017~2019年间治疗了4例先天性食管闭锁与狭窄患儿, 所有患儿均得到了有效治疗, 术后长期随访中, 患儿进食良好, 未出现吞咽困难及其他严重并发症. 除了食管闭锁之外, 2014年, Russell等人[26]利用磁吻合技术治疗了1例先天性肛门-直肠畸形的患儿, 首先通过结肠造瘘口将一枚磁体放置于狭窄部位近端, 再通过肛门将另一枚磁体放置于狭窄部位远端, 通过磁体间的相互挤压打通了狭窄段. 同年, Zaritzky等人[27]也报道了利用磁吻合技术成功治疗17例消化道梗阻、狭窄或闭锁的病人.

磁吻合技术除了可用于治疗食管和结直肠畸形之外, 还可以作为良性胆道梗阻的微创治疗手段之一. 2001年, 日本学者Takao等人[28]利用磁吻合技术为1例胃癌切除术后胆总管梗阻的患者进行了胆管与肠道之间的吻合, 再次为患者恢复了胆管与肠道之间的连续性. 其中, 胆道狭窄近端的磁体主要通过经皮经肝穿刺建立的通道放置, 而肠道内的磁体通过内镜下放置, 两侧磁体相互吸引挤压便可在胆道与肠道之间建立通道, 再次恢复胆道与肠道之间的连续性. 另有学者利用相似的技术治疗了胆道狭窄患者, 尤其是肝脏术后的胆道吻合口狭窄, 其中, 位于狭窄段近端的磁体主要通过经皮经肝建立的通道放置, 而狭窄段远端的磁体通过十二指肠镜下放置, 此方法可使患者避免再次行开腹手术治疗, 而对于无法行手术治疗的患者, 可避免其行终身胆道外引流. 国内李宇等人[29]利用该技术治疗了6例难治性良性胆道狭窄或胆道完全梗阻患者, 所有患者均取得满意效果. 目前, 该方法已被《良性胆道狭窄内镜处理亚太共识》推荐为常规内镜或经皮穿刺治疗失败的良性胆道狭窄的首选治疗方法[30].

2 磁吻合技术在血管重建中的应用

血管吻合是整形及器官移植手术常见的操作, 血管吻合的速度和质量也是影响术后结局的关键. 传统的血管吻合主要依靠手工缝合完成, 其操作复杂、费时费力, 使得靶器官需要经历一段较长的缺血或淤血时间, 术后并发症居高不下. 磁吻合技术以其独特的特性可作为一种快速的血管吻合方法.

最早将磁吻合技术应用于血管吻合的是日本学者Obora[31], 其于1973年利用特殊设计的钐钴磁体进行了犬股动脉和大鼠颈静脉端-端吻合, 术后20 d组织学检查显示血管中层连续性良好, 吻合口内膜为单层内皮细胞, 术后长期观察未见血管内膜增厚或坏死. 但是, Obora所用的磁体磁能积较小, 吻合装置体型较大, 限制了其在临床的推广应用. 受此方法启发, Shi等人[32]于2006年利用磁吻合技术进行了犬肝移植血管快速重建(图4), 其所用的磁体材料为磁能积较大的稀土钕铁硼, 依据不同血管直径采用不同内径的圆环形磁体, 表面镀钛以满足体内永久植入需求, 在保证吻合所用磁力的状况下磁性装置的体积大幅度降低. 在进行血管吻合时, 将血管断端穿过磁环外翻后固定, 两侧磁环对吸便可完成血管吻合. 2013年, 刘仕琪等人[33]利用加载有针的磁性吻合环进行了犬门静脉端-端吻合实验, 结果显示利用磁吻合技术可显著缩短血管吻合时间, 术后随访未见吻合口狭窄, 该团队认为利用磁吻合是一种快速有效的血管吻合方法. 同年, 该团队[34]利用此方法进行了动物肝脏移植血管快速吻合, 结果显示磁吻合技术显著缩短了无肝期时间, 术后并发症发生率也显著降低, 组织学检查显示磁吻合组吻合口愈合良好, 血管各层连续性完整. 除此之外, 刘仕琪等人[35]还利用磁吻合技术进行了犬股动脉端-端吻合实验, 显著缩短了动脉吻合时间, 吻合口可耐受正常血压, 组织学检查显示吻合口愈合良好, 内皮细胞排列整齐, 形态规则.

磁吻合技术除了可应用于血管的端-端吻合之外, 还可以应用于血管侧-侧吻合. 2003年, 德国学者Falk等人[36]利用特殊设计的磁性装置在动物实验中成功进行

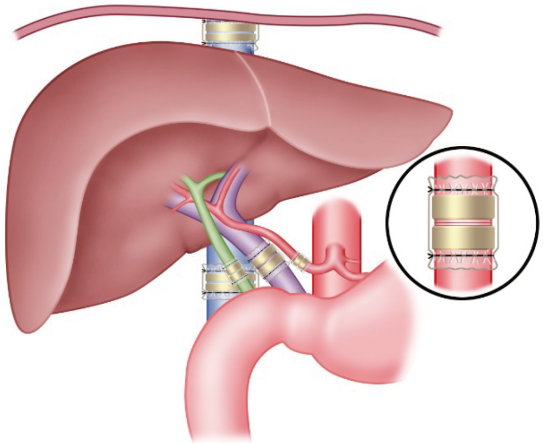


图 4 (网络版彩色)磁力肝脏移植血管快速吻合

Figure 4 (Color online) Magnetic compression anastomosis in rapid revascularization in liver transplantation

了动脉侧-侧吻合实验. 紧接着, 该研究团队[37]利用此装置为32例患者进行了多支冠状动脉搭桥手术, 结果显示中位吻合时间为137 s, 术后吻合口通畅率为93.5%, 高于手工吻合组(91.7%). 2004年, 美国学者Filsoufi等人[38]利用MVP磁性血管吻合器(MVP system; Ventrica, Inc, Fremont, California, USA)在动物实验中进行了冠脉侧-侧吻合术, 结果显示平均吻合时间为2~3 min, 术后1月血管吻合口通畅率为97%, 术后半年的组织学检查发现磁体表面覆盖血管内膜, 磁体之间有活组织存在. 紧接着, Wong等人[39]利用MVP血管吻合器对1名心肌缺血患者成功进行了冠状动脉旁路手术, 术后造影显示吻合口通畅良好. 除此之外, Athanasiou等人[40]也利用MVP磁性血管吻合器成功进行了左胸内动脉至冠状动脉左前降支之间的吻合. 同时, Klima等人[41]评估了利用此磁性吻合器进行微创直接冠状动脉搭桥术患者的临床和血管造影结果, 平均吻合时间为199 s, 术后未见吻合器相关并发症, 长期随访未见吻合口阻塞. 2004年, Erdmann等人[42]利用一种新型的磁性血管吻合器在动物实验中进行了动脉与静脉之间的侧-侧吻合, 结果显示吻合口通畅率高达100%, 术后未见动脉瘤等并发症的发生. 磁吻合技术除了可应用于冠脉搭桥手术之外, 还可以应用于门脉高压病人的分流手术. 2013年, Yan等人[43]设计了可实现门腔分流的磁性器械并在动物实验中进行了可行性探索, 结果显示所有动物均成功完成手术, 术后随访未见出血、吻合口血栓形成等并发症的发生. 此外, Xue等人[44]利用磁吻合技术在动物实验中成功开展了脾肾分流手术.

3 磁吻合技术应用的关键问题

3.1 磁吻合所用磁性装置的表面改性问题

目前磁吻合技术所用的磁性材料易碎、耐蚀性差, 而生物体内理化环境复杂, 若磁性装置不进行任何表面处理, 当其植入体内可能发生崩解, 导致磁力衰减而不能完成相应的吻合; 此外, 磁体崩解可能释放有害金属离子, 危害机体. 因此, 对磁吻合所用磁性装置进行生物体内植入无害化表面处理是其开展动物实验和临床应用首要考虑的问题. 依据磁性装置在体内停留的时间可分为暂时性留置和永久性留置. 暂时性留置是指磁性装置在体内短暂停留, 待吻合完成后便经自然腔道排出体外, 如磁力胃-肠道吻合中所用的装置. 此类装置可采用的表面改性方案包括氮化钛涂层、聚氨酯包裹、聚碳酸酯包裹、聚酰胺纸包裹以及聚四氟乙烯包裹. 永久留置是指磁性装置在体内永久性留置, 如磁力血管端-端吻合和部分血管侧-侧吻合. 此类装置可采用的表面处理方案为薄钛壳封装.

3.2 适用于不同组织吻合的磁性装置的外形设计

在设计磁吻合所用磁性装置时, 需要考虑以下两个问题: 首先是适用于不同组织吻合状态下最适磁体大小及形状的设计. 磁体的大小和形状主要取决于拟吻合管腔局部的解剖因素和磁体导入途径, 例如在利用磁吻合解除胆道狭窄/闭塞的过程中, 胆道狭窄段两侧的管腔为圆形且直径均较小, 因此磁体外形为圆柱状, 直径较小, 尾部增加固定结构, 便于连接引导装置, 使得其能经皮窦道和内镜下放置至狭窄段两侧. 其次是磁力大小的选择问题. 不同的组织吻合所用的磁力不尽相同, 若磁力太小则可能导致吻合口裂开或梗阻段不能解除, 而磁力过大可能导致磁体在其周围组织还未完全愈合的情况下便从吻合口脱落, 进而导致吻合口瘘的形成. 因此, 选择合适的磁力大小也是保证吻合口质量的重要因素, 如研究发现适用于胆-肠吻合的最适磁力压强为0.2~0.3 MPa. 此外, 相同的外形和大小下, 不同磁能积材料所产生的的磁力也不尽相同, 当确定磁性装置的形状和大小之后, 还应选择具备合适磁能积的磁性材料.

4 展望

磁吻合技术作为一种新型的管腔吻合技术已在临床中显示出了良好的效果. 与手工缝合及钉式吻合相比较, 磁吻合具备以下优势: (1) 磁吻合为“非贯穿式”吻合. 目前临床上广泛应用的手工缝合和机械吻合器吻合的本质是借助缝线或钛钉穿透吻合口两侧的组织, 通过牵拉力使两侧组织靠拢后逐渐愈合. 此类方法一方面增加了操作难度, 另一方面由缝线或钛钉穿透组织所导致的“针孔效应”可能导致吻合口瘘的发生. 此外, 外科缝线和钛钉均为异物, 吻合口局部可能因“异物反应”而出现炎症反应, 进而导致吻合口狭窄的形成. 磁吻合在进行管腔吻合或梗阻再通的过程中操作简便, 磁性装置对局部组织无“贯穿作用”, 使得操作时间缩短, 术后并发症的发生率显著降低. 在未来, 磁吻合技术有望取代手工缝合成为某些消化道管腔吻合(胆-肠吻合、胰-肠吻合)的主要方式. (2) 磁吻合为“非接触

式”吻合. 磁力作为一种特殊的物理现象, 其具备众多特殊的性质, 如: “隔物相吸”, 即磁体之间可在不接触的情况下相互吸引, 而磁力随着磁体间距离的减小呈“指数级”增加; “自动对位”, 即当不同的磁体在错位状态下相互靠近时, 磁体会自动调整位置, 使其精准定位相互吸引. 磁体的这些特性为外科中某些管腔梗阻性疾病提供了微创解决方案. 如先天性食管闭锁, 传统的治疗方法为开胸行闭锁两侧食管端-端吻合术, 此种方法创伤大, 术后并发症高发; 而磁吻合技术可在微创条件下治疗先天性食管闭锁, 即经口和胃造瘘口于闭锁段两侧各放置一个磁体, 通过磁力相互吸引挤压闭锁段, 最终实现闭锁食管再通. 基于此, 磁吻合技术还将为管腔狭窄性疾病(消化道管腔吻合术后梗阻、输尿管狭窄、尿道狭窄/闭锁等)提供微创治疗方案.

参考文献

1 Lv Y, Shi Y. Xi’an consensus on magnetic surgery. Hepatobil Surg Nutr, 2019, 8: 177–178
2 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 [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]
3 Chen L, Bian S B. Choice and reasonable application of staplers for gastrointestinal surgery (in Chinese). Chin J Gastronintest Surg, 2013, 16: 601–604 [陈凛, 边识博. 胃肠手术中吻合器的选择及合理使用. 中华胃肠外科杂志, 2013, 16: 601–604]
4 Schorn S, Demir I E, Vogel T, et al. Mortality and postoperative complications after different types of surgical reconstruction following pancreaticoduodenectomy: A systematic review with meta-analysis. Langenbecks Arch Surg, 2019, 404: 141–157
5 Kadaba R S, Bowers K A, Khorsandi S, et al. Complications of biliary-enteric anastomoses. Annals, 2017, 99: 210–215
6 Kanshin N N, Permiakov N K, Dzhalagoniia R A, et al. Sutureless anastomoses in gastrointestinal surgery with and without steady magnetic field (experimental study). Arkhiv Patologii, 1978, 40: 56–61
7 Jansen A, Becker A E, Brummelkamp W H, et al. The importance of the apposition of the submucosal intestinal layers for primary wound healing of intestinal anastomosis. Surg Gynecol Obstet, 1981, 152: 51–58
8 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
9 Cope C. Creation of compression gastroenterostomy by means of the oral, percutaneous, or surgical introduction of magnets: Feasibility study in swine. J Vascu Interv Radiol, 1995, 6: 539–545
10 Jamshidi R, Stephenson J T, Clay J G, et al. Magnamosis: Magnetic compression anastomosis with comparison to suture and staple techniques. J Pediatr Surg, 2009, 44: 222–228
11 Pichakron K O, Jelin E B, Hirose S, et al. Magnamosis II: Magnetic compression anastomosis for minimally invasive gastrojejunostomy and jejunojejunostomy. J Am Coll Surgeons, 2011, 212: 42–49
12 Gonzales K D, Douglas G, Pichakron K O, et al. Magnamosis III: Delivery of a magnetic compression anastomosis device using minimally invasive endoscopic techniques. J Pediatr Surg, 2012, 47: 1291–1295
13 Wall J, Diana M, Leroy J, et al. Magnamosis IV: Magnetic compression anastomosis for minimally invasive colorectal surgery. Endoscopy, 2013, 45: 643–648
14 Ryou M, Agoston A T, Thompson C C. Endoscopic intestinal bypass creation by using self-assembling magnets in a porcine model. Gastrointest Endosc, 2016, 83: 821–825
15 Machytka E, Bužga M, Zonca P, et al. Partial jejunal diversion using an incisionless magnetic anastomosis system: 1-year interim results in patients with obesity and diabetes. Gastrointest Endosc, 2017, 86: 904–912
16 Li J H, Lü Y, Zhang Z Y, et al. Application of sutureless magnetic bilioenteric anastomosis stent for one-stage reconstruction of bilioenteric continuity after acute bile duct injury (in Chinese). Chin J Gastronintest Surg, 2007, 13: 767–770 [李建辉, 吕毅, 张智勇, 等. 急性胆管损伤后应用磁性胆肠吻合支架一期修复胆肠连续性的实验研究. 中华肝胆外科杂志, 2007, 13: 767–770]
17 Fan C, Ma J, Zhang H, et al. Sutureless intestinal anastomosis with a novel device of magnetic compression anastomosis. Chin Med Sci J, 2011, 26: 182–189
18 Cui X, Lei P, Liu S Q, et al. A sutureless method for digestive tract reconstruction during pancreaticoduodenectomy in a dog model. Int J Clin Exp Med, 2015, 8: 289–296
19 Xue F, Guo H C, Li J P, et al. Choledochojejunostomy with an innovative magnetic compressive anastomosis: How to determine optimal pressure? World J Gastroenterol, 2016, 22: 2326–2335
20 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

21 Liu X M, Yan X P, Zhang H K, et al. Magnetic anastomosis for biliojejunostomy: First prospective clinical trial. World J Surg, 2018, 42: 4039–4045

22 Liu X M, Li Y, Zhang H K, et al. Laparoscopic magnetic compression biliojejunostomy: A preliminary clinical study. J Surg Res, 2019, 236: 60–67

23 Liu X M, Li Y, Xiang J X, et al. Magnetic compression anastomosis for biliojejunostomy and pancreaticojejunostomy in Whipple's procedure: An initial clinical study. J Gastroen Hepatol, 2019, 34: 589–594

24 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

25 Liu S Q, Lü Y, Zhao J R, et al. Clinical efficacy of magnetic compression anastomosis for congenital esophageal atresia and stenosis (in Chinese). Chin J Dig Surg, 2019, 18: 581–586 [刘仕琪, 吕毅, 赵静儒, 等. 磁吻合技术治疗先天性食管闭锁与狭窄的临床疗效. 中华消化外科杂志, 2019, 18: 581–586]

26 Russell K W, Rollins M D, Feola G P, et al. Magnamosis: A novel technique for the management of rectal atresia. BMJ Case Rep, 2014, 2014: bcr2013201330, doi: 10.1136/bcr-2013-201330

27 Zaritzky M, Ben R, Johnston K. Magnetic gastrointestinal anastomosis in pediatric patients. J Pediatr Surg, 2014, 49: 1131–1137

28 Takao S, Matsuo Y, Shinchi H, et al. Magnetic compression anastomosis for benign obstruction of the common bile duct. Endoscopy, 2001, 33: 988–990

29 Li Y, Sun H, Yan X P, et al. Magnetic compression anastomosis in the treatment of six cases of benign bile duct stricture (in Chinese). Chin J Dig, 2018, 38: 848–851 [李宇, 孙昊, 严小鹏, 等. 磁压榨吻合治疗六例良性胆管狭窄. 中华消化杂志, 2018, 38: 848–851]

30 Hu B, Sun B, Cai Q, et al. Asia-Pacific consensus guidelines for endoscopic management of benign biliary strictures. Gastrointest Endosc, 2017, 86: 44–58

31 Obora Y, Tamaki N, Matsumoto S. Nonsuture microvascular anastomosis using magnet rings: Preliminary report. Surg Neurol, 1978, 9: 117–120

32 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

33 Liu S Q, Lei P, Gao R, et al. Experimental animal study of rapid and sutureless anastomosis of portal vein by the magnetic compression anastomosis technique (in Chinese). Chin J Hepatobil Surg, 2013, 19: 758–761 [刘仕琪, 雷鹏, 高睿, 等. 磁吻合技术实现门静脉快速无缝线吻合动物实验研究. 中华肝胆外科杂志, 2013, 19: 758–761]

34 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

35 Liu S Q, Lei P, Lü Y, et al. A comparative study on magnetic compression anastomosis and traditional hand-suturing technology in canine femoral artery anastomosis (in Chinese). Chin J Reparat Reconstruct Surg, 2014, 28: 885–890 [刘仕琪, 雷鹏, 吕毅, 等. 犬股动脉磁吻合技术与传统吻合技术的比较研究. 中国修复重建外科杂志, 2014, 28: 885–890]

36 Falk V, Walther T, Stein H, et al. Facilitated endoscopic beating heart coronary artery bypass grafting using a magnetic coupling device. J Thorac Cardiov Surg, 2003, 126: 1575–1579

37 Klima U, Falk V, Maringka M, et al. Magnetic vascular coupling for distal anastomosis in coronary artery bypass grafting: A multicenter trial. J Thorac Cardiov Surg, 2003, 126: 1568–1574

38 Filsoufi F, Farivar R S, Aklog L, et al. Automated distal coronary bypass with a novel magnetic coupler (MVP system). J Thorac Cardiov Surg, 2004, 127: 185–192

39 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

40 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

41 Klima U, MacVaugh H, Bagaev E, et al. Magnetic vascular port in minimally invasive direct coronary artery bypass grafting. Circulation, 2004, 110: Ⅱ55–Ⅱ60

42 Erdmann D, Sweis R, Heitmann C, et al. Side-to-side sutureless vascular anastomosis with magnets. J Vasc Surg, 2004, 40: 505–511

43 Yan X, Fan C, Ma J, et al. Portacaval shunt established in six dogs using magnetic compression technique. PLoS One, 2013, 8: e76873

44 Xue F, Li J, Lu J, et al. Splenorenal shunt via magnetic compression technique: A feasibility study in canine and cadaver. Minim Invasiv Ther All Technol, 2016, 25: 329–336

Summary for “磁吻合技术及应用”

Definition and application of magnetic compression anastomosis

Xufeng Zhang[1,2,3], Qiang Lu[1,2,3], Yu Li[1,2,3], Jigang Bai[1,2,3], Xiaogang Zhang[1,2,3], Xin Zhang[4], Chao Fan[1,2,3], Jianhui Li[2,3,5] & Xuemin Liu[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, the First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China;*
[3] *Shaanxi Provincial Center for Regenerative Medicine and Surgical Engineering, the First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China;*
[4] *High Magnetic Field Laboratory, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;*
[5] *Department of Surgical Oncology, Shaanxi Provicial People's Hospital, Xi'an 710068, China*
* Corresponding author, E-mail: a1090224@163.com

As a new technical discipline, magnetic surgery (MS) has attracted attention of many researchers all over the world for its broad application prospects in the diagnosis and treatment of diseases. MS can be grouped as the following five categories according to different applications and principles: Magnetic compression technique (MCT), magnetic navigation technique (MNT), magnetic anchor technique (MCT), magnetic levitation technique (MLT) and magnetic tracer technique (MTT). Among these techniques, the magnetic compression anastomosis can be used to accomplish certain surgical procedures through the special properties between magnetic materials, such as lumen anastomosis and recanalization, closure of abnormal channels between tissues or organs and restriction anomalous flow of lumen contents. Since being first described in 1978 by Obora, magnetic anastomosis has been initially attempted in treatment of esophageal atresia and diverticula, diversion of gastrointestinal tract, and recanalization of the biliary stricture. Because of the encouraging and broad perspective of magnetic anastomosis in clinical medicine, a new word “magnamosis” has been recommended by Dr. Michael Harrison, one of the leading scientists in this field. Magnetic anastomosis, as an important branch of magnetic compression anastomosis, is essentially a technique that uses magnetic force to transform the lumen anastomosis from the conventional “penetrating” anastomosis to a novel “non-penetrating” anastomosis to greatly simplify the procedure and reduce the rate of postoperative complications. For patients with gastrointestinal lumen occlusion or stenosis, magnetic anastomosis provides a new treatment strategy. This new method can complete the recanalization of digestive tract lumen under intervention method, and avoid major operations, such as laparotomy or thoracotomy. As such, magnetic anastomosis can greatly reduce surgical trauma, as well as incidence of postoperative complications. In addition, magnetic anastomosis can provide treatment options for conditions that cannot be treated with conventional methods, allowing patients to avoid life-long external drainage or fistulas in their lives. More commonly, magnetic anastomosis technology can also be applied to end-to-end, end-to-side, and side-to-side vascular anastomosis. Upon this technique, the time duration of anastomosis can be significantly shortened. Thus, the ischemia and congestion time of target organ can also be shortened, and postoperative complication incidence is significantly reduced. At present, this technique has been successfully applied in coronary and portosystemic bypass surgery, as well as organ transplantation. Surface modification and shape design of magnetic device are two key issues to be considered in magnetic anastomosis technology. The surface modification scheme of the magnetic device mainly depends on the time it remains in the body, while the shape design of the magnetic device mainly depends on the anatomical factors of the lumen to be anastomized, the way of implanting the magnet, and the amount of magnetic force required for the anastomosis. For more than 10 years, we have developed different types of magnets, and performed substantial pre-clinical and clinical studies on utilization of magnetic compression method in vascular, intestines, and biliary lumens connection or anastomosis, demonstrating its safety, which indicates a promising and broad application prospect of magnetic anastomosis. In view of the huge application potential of magnetic anastomosis technology in lumen anastomosis and recanalization, in the future, magnetic anastomosis technology will provide new treatment strategies for other lumen reconstruction (ureteral stenosis, urethral obstruction, etc.).

magnetic anastomosis, magnetic compression technique, magnetic surgery, lumen reconstruction

doi: 10.1360/TB-2019-0857